



**Kognitive Reserve im Erwerbsalter –  
kognitive Leistungsfähigkeit und psychophysiologische  
Informationsverarbeitung**

**D I S S E R T A T I O N**

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

eingereicht an der  
Lebenswissenschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin

von  
Dipl.-Psych. Xenija Weißbecker-Klaus

Präsidentin der Humboldt-Universität zu Berlin: Prof. Dr.-Ing. Dr. Sabine Kunst  
Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät: Prof. Dr. Bernhard Grimm

Gutachter: 1. Prof. Dr. rer. soc. Werner Sommer  
2. Dr. sc. med. Peter Ullsperger

Tag der mündlichen Prüfung: 09.11.2018

## **Danksagung**

Damit etwas gelingen kann, bedarf es nicht nur der notwendigen Fähigkeiten und der Motivation. Das Leben stellt uns vor viele Herausforderungen, führt uns an unsere Grenzen und erfordert das gleichzeitige Funktionieren in vielen Rollen. Diese Arbeit ist in einer Zeit entstanden, in der dafür weder Zeit noch anderweitige Ressourcen zur Verfügung standen. Ohne die fortwährende Zuversicht auf Gelingen und den festen Glauben daran von Frau Dr. Gabriele Freude und Herrn Dr. Ullsperger sowie das entgegengebrachte Vertrauen auf ein erfolgreiches Ende von Prof. Dr. Sommer wäre dieses Manuskript nicht entstanden. Sie haben mir Hoffnung, Energie, Trost und Motivation gespendet. Ein Mensch kann unter widrigsten Umständen Ziele erreichen, wenn jemand an ihn glaubt und das haben Sie all die Jahre getan! Meine Dankesworte reichen nicht aus, um all das wiederzugeben, was Ihr emotionaler Beistand und hervorragender fachlicher Rat für mich bedeutet hat. Ich danke von Herzen!

Auch danke ich allen (ehemaligen) Mitarbeitern der Gruppe 3.4, allen voran Herrn Dr. Schapkin, Herrn Dr. Rose, Frau Rahim, Frau Freyer, Carlis Horn und Robert Simon Sonnenberg für die schöne Laborzeit, fachlichen Rat und die Unterstützung bei der Datenverarbeitung. Frau Dr. Radüntz danke ich für die technische Unterstützung.

## **Zusammenfassung**

Bei altersbedingt abnehmender kognitiver Funktion stellt das steigende Renteneintrittsalter Arbeitgeber und -nehmer vor wachsende Herausforderungen. Das Konzept der kognitiven Reserve (CR), welches vorwiegend in der Alzheimer-Demenz-Forschung Anwendung findet, verspricht durch eine geistig stimulierende Lebensführung (bspw. durch hohe Schulbildung, Bilingualismus, Instrumentalunterricht, hohe Berufskomplexität, kognitiv und sozial anregende Umwelten) einen kumulativen Aufbau von Resilienz gegenüber altersassoziierten und/oder neuropathologisch bedingten kognitiven Defiziten. In der vorliegenden Untersuchung wird die Rolle der CR in Bezug auf die kognitive Leistungsfähigkeit und die neuronale Informationsverarbeitung gesunder Erwachsener im Berufsalter untersucht.

Unter Ableitung eines Elektroenzephalogramms bearbeiteten Probanden mittleren und hohen Erwerbsalters (34-45 J. und 46-62 J.) im 2-Jahres-Abstand Aufgaben zu drei Domänen exekutiver Funktionen: Arbeitsgedächtnis, kognitive Flexibilität und Inhibitionskontrolle.

Hoch-CR-Probanden zeigten sich aufgabenübergreifend leistungstärker mit schnelleren Reaktionen und insbesondere geringeren Fehlerraten. Reduzierte Leistung ließ sich in der Gering-CR-Gruppe tendenziell bei älteren Teilnehmern und in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen beobachten. Nach zwei Jahren zeigten Gering-CR-Ältere darüber hinaus eine deskriptiv leicht abnehmende Arbeitsgedächtniskapazität, während Hoch-CR-Ältere ihre hohen Ausgangswerte deutlich steigern konnten.

Die P3-Amplitude variierte systematisch in Abhängigkeit von der CR und dem Alter. Hoch-CR-Jüngere wiesen im Vergleich zu Gering-CR-Jüngeren in einigen Aufgaben höhere P3-Amplituden auf, während Hoch-CR-Ältere im Gegensatz zu Gering-CR-Älteren kleinere P3-Amplituden generierten. Die kürzeren P3-Latenzen in der Hoch-CR-Gruppe wiesen zudem auf einen Unterschied in der neuronalen Verarbeitungsgeschwindigkeit hin. In der Aufgabe zur kognitiven Flexibilität ließ sich bei Gering-CR-Probanden ein Anterior-Shift der P3 beobachten, welcher im Rahmen der Kompensationshypothese diskutiert wird.

Die Untersuchungsergebnisse der Ausgangstestung konnten nach zwei Jahren nahezu vollständig repliziert werden.

Alterungsrelevante Leistungsvariablen und zentralnervöse Informationsverarbeitungsprozesse zeigten sich bereits im Berufsalter sensitiv gegenüber der CR. Das mittlere Erwachsenenalter sollte bei der Erarbeitung und Evaluation CR-basierter Maßnahmen zur Prävention kognitiver Defizite stärker berücksichtigt werden.

## Abstract

The increasing retirement date accompanied by an age-associated decline of cognitive functions poses growing challenges to employers and employees. The concept of the cognitive reserve (CR), which has originally been used in connection with Alzheimer's dementia research, promises a cumulative resilience to brain damage-associated cognitive deficits through intellectually stimulating lifestyle activities (e.g. through higher education, bilingualism, instrumental education, high occupational complexity, cognitively and socially stimulating environments). The present study examines the role of CR relating to cognitive performance and neuronal information processing of healthy adults in working age.

Using an electroencephalogram, subjects of middle and high working age (34-45 years and 46-62 years of age, respectively) completed tasks on three domains of executive functions: working memory, cognitive flexibility and inhibition control. In addition, follow-up assessments of these factors were conducted after two years.

High-CR subjects performed better across tasks than Low-CR subjects, with faster reaction times and lower error rates. Reduced performance in the Low-CR group tended to be more common among older participants and during the more challenging task conditions. In addition, after two years, Low-CR older workers showed a decreased working memory capacity while older High-CR individuals improved their higher performance.

The P3 amplitude of the event-related brain potential varied systematically as a function of CR and age. High-CR younger individuals revealed higher P3 amplitudes in several tasks compared to Low-CR younger individuals, while High-CR older individuals generated smaller P3 amplitudes than Low-CR older individuals. The shorter P3 peak-latencies of the High-CR group suggested moreover a difference in neural processing speed. When testing cognitive flexibility an anterior shift of the P3 was observed in older Low-CR subjects, which is discussed in the context of the compensation hypothesis.

The results were almost completely replicated after two years.

Age-related performance variables and neuronal information processes revealed to be sensitive to CR already at working age. These findings recommend more research on early adulthood in the development and evaluation of CR-based programs to prevent cognitive deficits.

## Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....                                   | <b>ii</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....                                     | <b>iii</b> |
| <b>Anhangsverzeichnis</b> .....                                      | <b>iv</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....                                   | <b>v</b>   |
| <b>1 Einleitung</b> .....  | <b>1</b>   |
| <b>2 Das Konzept der kognitiven Reserve</b> .....                    | <b>4</b>   |
| 2.1 Komponenten der kognitiven Reserve .....                         | 6          |
| 2.2 Erfassung der kognitiven Reserve .....                           | 17         |
| 2.3 Neuronale Korrelate der kognitiven Reserve .....                 | 19         |
| <b>3 Kognitive Leistungsfähigkeit und der Alterungsprozess</b> ..... | <b>23</b>  |
| 3.1 Exekutive Funktionen.....  | 25         |
| 3.2 Funktionale Bildgebung und kognitives Altern .....               | 31         |
| 3.3 Ereigniskorrelierte Potentiale des Elektroenzephalogramms .....  | 35         |
| <b>4 Fragestellungen und Hypothesen</b> .....                        | <b>41</b>  |
| <b>5 Methode</b> .....   | <b>46</b>  |
| 5.1 Stichprobe.....  | 46         |
| 5.2 Aufgabenset.....   | 48         |
| 5.2.1 Erfassung der Arbeitsgedächtnisleistung .....                  | 48         |
| 5.2.2 Erfassung der Inhibitionsleistung.....                         | 55         |
| 5.2.3 Erfassung der kognitiven Flexibilität .....                    | 56         |
| 5.3 Erfassung der kognitiven Reserve .....                           | 59         |
| 5.4 Untersuchungsablauf.....   | 65         |
| 5.5 Physiologische Registrierung .....                               | 67         |
| 5.6 Datenaufbereitung und -analyse .....                             | 68         |
| <b>6 Ergebnisse</b> .....  | <b>74</b>  |
| 6.1 Leistungsdaten.....  | 74         |
| 6.2 Elektrophysiologische Daten.....                                 | 90         |
| <b>7 Diskussion</b> .....  | <b>106</b> |
| <b>Fazit</b> .....   | <b>127</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b> .....                                    | <b>129</b> |
| <b>Anhang</b> .....  | <b>188</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| <b>Abbildung 1 a-d:</b> Mechanismen der kognitiven Reserve nach Steffener & Stern (2012).....                            | 21  |
| <b>Abbildung 2:</b> Veränderung kognitiver Fähigkeiten (Schaie, 2004) .....  | 23  |
| <b>Abbildung 3 a, b:</b> Sichtweisen auf die Zunahme frontaler Aktivierung (Buckner, 2005) .....                         | 34  |
| <b>Abbildung 4:</b> Stimulusabfolge in der 0-back-Aufgabe.....   | 49  |
| <b>Abbildung 5:</b> Stimulusabfolge in der 2-back-Aufgabe.....   | 49  |
| <b>Abbildung 6:</b> Stimulusabfolge in der Sternberg-(simultan)Aufgabe .....   | 51  |
| <b>Abbildung 7:</b> Stimulusabfolge in der Sternberg-(sukzessiv)Aufgabe.....   | 51  |
| <b>Abbildung 8:</b> Stimulusabfolge in der AOSPAN-Aufgabe (Unsworth et al., 2005) .....                                  | 54  |
| <b>Abbildung 9:</b> Stimulusabfolge in der Stroop-Aufgabe.....   | 56  |
| <b>Abbildung 10:</b> Stimulusabfolge im NUM-Block der Switch-Aufgabe .....   | 57  |
| <b>Abbildung 11:</b> Stimulusabfolge im GER-Block der Switch-Aufgabe .....   | 57  |
| <b>Abbildung 12:</b> Stimulusabfolge im XXX-Block der Switch-Aufgabe.....  | 58  |
| <b>Abbildung 13:</b> Dendrogramm .....   | 64  |
| <b>Abbildung 14:</b> Kumulierte Häufigkeit aggregierter Reaktionszeiten in der 2-back-Aufgabe .....                      | 77  |
| <b>Abbildung 15:</b> Kumulierte Häufigkeit aggregierter Reaktionszeiten in der Switch-Aufgabe.....                       | 78  |
| <b>Abbildung 16:</b> Reaktionszeitmediane in der Stroop-Aufgabe .....  | 82  |
| <b>Abbildung 17:</b> Reaktionszeitmediane in der 2-back-Aufgabe bei langen ITI zu t1 .....                               | 84  |
| <b>Abbildung 18 a, b:</b> AOSPAN-Scores.....   | 85  |
| <b>Abbildung 19:</b> EKP-Kurvenverlauf und Topographie in der 0-back-Aufgabe.....  | 97  |
| <b>Abbildung 20:</b> EKP-Kurvenverlauf und Topographie in der 2-back-Aufgabe.....  | 97  |
| <b>Abbildung 21:</b> EKP-Kurvenverlauf und Topographie in der Sternberg-(sukzessiv)Aufgabe .....                         | 98  |
| <b>Abbildung 22:</b> EKP-Kurvenverlauf und Topographie in der Sternberg-(simultan)Aufgabe .....                          | 99  |
| <b>Abbildung 23:</b> EKP-Kurvenverlauf und Topographie in der Stroop-Aufgabe.....  | 99  |
| <b>Abbildung 24:</b> EKP-Kurvenverlauf und Topographie in der Switch-Aufgabe .....                                       | 100 |
| <b>Abbildung 25 a, b:</b> P3-Amplitudendifferenz zwischen parietalen und frontalen Elektroden in der Switch-Aufgabe..... | 105 |

## **Tabellenverzeichnis**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabelle 1:</b> Kontaktprotokoll .....  | 47  |
| <b>Tabelle 2:</b> Punktezuteilung zur Bildung des Summenscores „soziale Aktivität“ .....    | 62  |
| <b>Tabelle 3:</b> Punktezuteilung zur Bildung des Summenscores „mentale Aktivität“. ....    | 64  |
| <b>Tabelle 4:</b> CR-Clustermittelwerte.....  | 65  |
| <b>Tabelle 5:</b> Zeitintervalle zur Bestimmung der P3-Komponente.....                      | 70  |
| <b>Tabelle 6:</b> Aufgabenbedingungen und die Reaktionsfenster .....                        | 71  |
| <b>Tabelle 7:</b> Reaktionszeitmediane.....   | 76  |
| <b>Tabelle 8:</b> AOSPAN-Scores .....   | 78  |
| <b>Tabelle 9:</b> Fehlerraten.....  | 80  |
| <b>Tabelle 10:</b> Differenz der Reaktionszeitmediane ( $t_1 - t_2$ ). ....                 | 89  |
| <b>Tabelle 11:</b> P3-Peak-Amplituden .....   | 92  |
| <b>Tabelle 12:</b> P3-Peak-Latenzen.....  | 94  |
| <b>Tabelle 13:</b> Normalisierte Amplitudenwerte der gemittelten Elektroden. ....           | 103 |
| <b>Tabelle 14:</b> P3-Amplitudendifferenzen der normalisierten gemittelten Elektroden ..... | 104 |

## Anhangsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| <b>Anhang A:</b> Informationsschreiben .....                                      | 188 |
| <b>Anhang B:</b> Ausschlusskriterien .....  | 189 |
| <b>Anhang C:</b> Fragebogen zur Erfassung der CR.....                             | 190 |
| <b>Anhang D:</b> Vitalitätsparameter nach Meißner-Pöthig und Michalak (1997)..... | 197 |
| <b>Anhang E:</b> Zuspierungserklärung.....  | 198 |
| <b>Anhang F:</b> Einwilligung zur Kontaktaufnahme .....                           | 199 |
| <b>Anhang G:</b> Einwilligungserklärung zur Teilnahme am Experiment.....          | 200 |
| <b>Anhang H:</b> Reaktionszeiten für die jüngere Probandengruppe.....             | 201 |
| <b>Anhang I:</b> Reaktionszeiten für die ältere Probandengruppe .....             | 202 |
| <b>Anhang J:</b> Fehlerraten für die jüngere Probandengruppe .....                | 203 |
| <b>Anhang K:</b> Fehlerraten für die ältere Probandengruppe .....                 | 204 |
| <b>Anhang L:</b> Interkorrelationsmatrix der Reaktionszeitmediane .....           | 205 |
| <b>Anhang M:</b> Interkorrelationsmatrix der Fehlerraten .....                    | 206 |
| <b>Anhang N:</b> P3-Peak-Amplituden für die jüngere Probandengruppe.....          | 207 |
| <b>Anhang O:</b> P3-Peak-Amplituden für die ältere Probandengruppe.....           | 208 |
| <b>Anhang P:</b> P3-Peak-Latenzen für die jüngere Probandengruppe.....            | 209 |
| <b>Anhang Q:</b> P3-Peak-Latenzen für die ältere Probandengruppe .....            | 210 |



## Abkürzungsverzeichnis<sup>1</sup>

|        |  |
|--------|--|
| AD     | Alzheimer Demenz   |
| AG     | Arbeitsgedächtnis  |
| ANOVA  | analysis of variance / Varianzanalyse                          |
| BR     | brain reserve / Gehirnreserve                                  |
| CAPI   | Computer Assisted Personal Interview                           |
| CR     | cognitive reserve / kognitive Reserve                          |
| CT     | Computertomographie  |
| EEG    | Elektroenzephalographie  |
| EKP    | ereigniskorreliertes Potential                                 |
| ER     | erroneous response / fehlerhafte Reaktion                      |
| FA     | false alarm / falscher Alarm                                   |
| FH     | Fachhochschulabschluss   |
| IH     | Inhibitionskontrolle   |
| IQ     | Intelligenzquotient  |
| KF     | kognitive Flexibilität   |
| KI     | Konfidenzintervall   |
| KZG    | Kurzzeitgedächtnis   |
| MCI    | mild cognitive impairment / leichte kognitive Beeinträchtigung |
| (f)MRT | (funktionelle) Magnetresonanztomographie                       |
| MS     | Memory-Set   |
| OM     | omission / ausgelassene Reaktion                               |
| OR     | Odds Ratio   |
| PET    | Positronen-Emissions-Tomographie                               |
| PFC    | präfrontaler Kortex  |
| ZST    | Zahlensymboltest   |

---

<sup>1</sup> Die Abkürzungen werden nach ihrer Einführung nicht durchgehend benutzt, sondern stehen im Dienste des Leseflusses und Leseverständnisses.

# 1 Einleitung

Während das Medianalter der deutschen Bevölkerung im Jahr 1990 bei 37.1 Jahren lag, gibt das statistische Bundesamt für das Jahr 2016 ein Median von 46 Jahren an, der prognostisch in den nächsten Jahrzehnten weiterhin steigen wird (Statistisches Bundesamt, 2015). Die zunehmende Lebenserwartung bei weiterhin zu niedrigen Geburtsziffern verändert durch die kompensatorische schrittweise Erhöhung des Renteneintrittsalters auf 67 (und möglicherweise 70) Jahre unweigerlich die Arbeitnehmerstruktur und stellt die Arbeitspsychologie vor neue Herausforderungen (Deutsche Rentenversicherung, 2017). Ein steigender Altersdurchschnitt ist assoziiert mit einer systematischen Abnahme kognitiver Funktionen, verstärkt ab dem 60. Lebensjahr (Schaie, 2005, 2010; Fabiani, 2012; Baltes, Reese, & Lipsitt, 1980), wobei eine beachtliche interindividuelle Heterogenität im Einsatzzeitpunkt und Ausmaß kognitiver Funktionsbeeinträchtigungen besteht (Adam, Bonsang, Grotz & Perelman, 2013; Schmitt, Wolff, Ferdinand & Kray, 2014; Willis, 1991). Gleichzeitig erfordern die Digitalisierung und Globalisierung vieler Arbeitsplätze immer mehr Flexibilität im Umgang mit neuen Medien und Kommunikationsnetzwerken. Die raschere Verfügbarkeit vielfältiger Anwendungen und Informationsdienste gleicht einer Informationsflut, die es durch zielgerichtetes, kontrolliertes und zugleich flexibles Handeln zu beherrschen gilt. Wesentlich hierbei sind die mit frontalen Gehirnregionen assoziierten exekutiven Funktionen, die als höhere Kontrollfunktionen die Handlungsabläufe u. a. über Funktionen des Arbeitsgedächtnisses, der Inhibitionsprozesse und der kognitiven Flexibilität, überwachen und koordinieren (Miyake et al., 2000). Da der präfrontale Kortex (PFC) zu den im Laufe des Lebens zuletzt ausreifenden und den im Zuge struktureller und funktionaler Altersveränderungen zuerst betroffenen Region zählt (Raz, 2004) und degenerative frontale Prozesse mit Leistungsver schlechterungen in exekutiven Funktionen, der Verarbeitungsgeschwindigkeit und Gedächtnisprozessen einhergehen (Ziegler et al., 2010; Gunning-Dixon & Raz, 2000; Frick & Benoit, 2010; Gelfo, Mandolesi, Serra, Sorrentino & Caltagirone, 2017), ist die Identifizierung von Einflussfaktoren zur Aufrechterhaltung und frühzeitigen Förderung exekutiver Leistungen nicht nur im Arbeitskontext von großer Bedeutung (Colcombe & Kramer, 2003; Daffner, 2010; Tatti, Rossi, Innocenti, Rossi & Santarnecchi, 2016).

Das Modell der kognitiven Reserve (CR, Stern, 2002) entstand aus Beobachtungen, dass eine intellektuell und sozial anregende Lebensgestaltung (hoher Bildungsgrad, komplexe berufliche Anforderungen, reiche soziale Netzwerke, mental stimulierende Freizeitaktivitäten, Bilingualismus u. a.) nicht nur dem Erhalt kognitiver Funktionen im Rahmen

neurodegenerativer Erkrankungen dient, sondern auch einen Schutz gegenüber sich entwickelnden altersassoziierten neuronalen Veränderungen bietet (u. a. Harrison et al., 2015). Die Idee, dass das Gehirn durch Lebenserfahrung modifiziert werden kann, entstand bereits Ende des 19. Jh. und erfuhr Mitte des 20. Jh. durch Hebb (1949) eine breite Akzeptanz (nach Gelfo et al., 2017). „It is known that the brain can be affected by every experience, with the production of transient or enduring changes (Kolb and Teskey, 2012)“ (Gelfo et al., 2017, S.4). Der CR werden sowohl direkte neuroprotektive als auch indirekte kompensatorische Einflüsse auf die Kognition zugeschrieben, wenngleich die genauen Wirkmechanismen noch in der Erforschung sind. Stern (2002) zufolge erleichtert durch kognitiv stimulierende Lebenserfahrungen angereicherte hohe CR eine flexiblere Strategienutzung, befähigt zum effizienteren Arbeiten und hilft, nicht mehr ausreichend funktionierende Netzwerke kompensatorisch durch andere zu ersetzen. Es liegt nahe, dass diese Funktionen, altersassoziierte exekutive Leistungsdefizite relativieren und eine erfolgreiche Partizipation am Arbeitsleben erleichtern könnten.

Da das Konzept der CR zum überwiegenden Teil im Rahmen der Prävention von Demenzerkrankungen, insbesondere der Alzheimer Demenz (AD), erforscht wurde, soll in der vorliegenden Untersuchung die Rolle der CR für die Kognition und die elektrophysiologische Informationsverarbeitung im mittleren (jung) und hohen (alt) Berufsalter im Rahmen von zwei Untersuchungszeitpunkten im 2-Jahres-Abstand analysiert und bewertet werden.

Im nachfolgenden **Kapitel 2** wird dabei zunächst das theoretische Konzept der kognitiven Reserve vorgestellt, der Stand der empirischen Forschung zu den einzelnen CR-Komponenten (Bildung, Beruf, Bilingualismus, Instrumentalunterricht, soziale Freizeitaktivitäten und kognitive Freizeitaktivitäten) dargelegt (2.1), die in der Literatur eingesetzten Erfassungsmethoden der CR kritisch beleuchtet (2.2) und der derzeitige Wissensstand zu den möglichen neuronalen Korrelaten der CR (2.3) vorgestellt.

Im **Kapitel 3** gilt die Aufmerksamkeit der kognitiven Leistungsfähigkeit und dem neurokognitiven Alterungsprozess. Es wird ein Überblick über die kognitiven Alterungsprozesse gegeben und ausführlich auf drei für die aktuelle Untersuchung relevante exekutive Leistungsfunktionen (Arbeitsgedächtnis, kognitive Flexibilität und Inhibitionskontrolle) eingegangen (3.1.). Es folgt eine Übersicht neuronaler Korrelate des kognitiven Alterns im Rahmen für die CR-Forschung üblicher bildgebender Untersuchungsverfahren (3.2.). Nachfolgend wird die in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Methodik der

ereigniskorrelierten Potentiale (EKP) vor dem Hintergrund abgebildeter kognitiver Prozesse und ihrer Veränderung mit zunehmendem Alter beleuchtet (3.3). Ein besonderes Augenmerk gilt hierbei der P3-Komponente.

Im **Kapitel 4** werden die Fragestellungen der Untersuchung hergeleitet und begründet sowie die Arbeitshypothesen für Leistungs- (Hyp. 1a–1d) und EKP-Daten (Hyp. 2a–2e) formuliert.

Das **Kapitel 5** beschreibt die eingesetzten Materialien und die Methodik.

Die Ergebnisse werden im **Kapitel 6** hypothesenbezogen zunächst für die Leistungsdaten und nachfolgend für die elektrophysiologischen Daten vorgestellt und mit einem Zwischenfazit nach jeder Hypothese zusammengefasst.

Im **Kapitel 7** folgt die Diskussion der Ergebnisse. Dabei werden zunächst die Leistungsdaten und anschließend die elektrophysiologischen Daten diskutiert. Es schließt sich eine zusammenfassende Ergebnisbetrachtung aus theoretischer und praktischer Sicht an. Das Diskussionskapitel wird mit einer kritischen Auseinandersetzung mit den Stärken und Limitationen der Untersuchung sowie einem Ausblick auf die künftige Forschung abgerundet. Das abschließende Fazit fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

## **2 Das Konzept der kognitiven Reserve**

Die sog. kognitive Reserve (Stern, 2002) ist ein hypothetisches Konstrukt zur Erklärung der interindividuell unterschiedlich starken Beeinträchtigung kognitiver Funktionen angesichts vergleichbarer altersassoziierter und/oder pathologischer neurodegenerativer Veränderungen des Gehirns (Jones et al., 2011; Barulli & Stern, 2013). Ursprünglich entwickelte sich das CR-Konzept (Stern, 2002, 2006, 2009) aus der Erforschung der Alzheimer Demenz. Dabei wurden in post mortem Untersuchungen AD-typische Hirnpathologien bei zu Lebzeiten kognitiv unauffälligen Personen entdeckt (Katzman et al., 1989; Crystal et al., 1988; Mortimer, Snowden & Markesbery, 2003; Ince, 2001; Roe, Xiong, Miller & Morris, 2007). Zudem entsprach der kognitive Status einiger Personen nicht dem anhand des Schädigungsgrades zu erwartendem Niveau, was für interindividuell unterschiedlich effektive Kompensationsmöglichkeiten neuronaler Schäden sprach. Gestützt durch nachfolgende epidemiologische und experimentelle Untersuchungen konnten unabhängig von der hohen genetischen Prädisposition für die AD (Gatz et al., 2006, 2007) zum einen bestimmte strukturelle Merkmale des Gehirns (brain reserve, BR), zum anderen die neuronale Funktion beeinflussende Lebensstilmerkmale (CR) im Zusammenhang mit einer mehrjährigen Verzögerung der klinischen Manifestation der Erkrankung identifiziert und in einen theoretischen Rahmen gebracht werden (Valenzuela & Sachdev, 2006; Vance et al., 2012). Die passive BR-Hypothese macht die unterschiedlich gute Kompensation neuronaler Schädigungen an anatomischen Merkmalen der interindividuell variierenden neuronalen Ausstattung fest. Diese kann direkt über Parameter wie das intrakranielle Volumen, Neuronenanzahl, Synapsendichte, das Volumen der Grauen Substanz u. ä. gemessen werden (Mori et al., 1997; Barulli & Stern, 2013; Sachdev & Valenzuela, 2009; Bartrés-Faz et al., 2009). Je mehr gesundes Substrat vorhanden, umso höher ist die Schwelle, bei deren Überschreitung Neuropathologien symptomatisch werden. Das Schwellenmodell berücksichtigt keine funktionalen Unterschiede neurokognitiver Verarbeitung und ist rein quantitativer Natur. Zahlreiche Studien konnten die Annahmen des BR-Modells bestätigen (Farias et al., 2012; Schofield, Logroscino, Andrews, Albert & Stern, 1997; Graves et al., 1996), aber es gibt gegenläufige Befunde (z. B. Edland et al., 2002; Jenkins, Fox, Rossor, Harvey & Rossor, 2000; Espinosa et al., 2006).

Im Kontrast dazu spricht das aktive Modell der CR einem kognitiv stimulierenden Lebenswandel durch Beeinflussung der Effizienz, Kapazität und/oder Flexibilität neuronaler Netzwerke eine Resilienzwirkung gegenüber kognitivem Leistungsabfall zu (Speer & Soldan,

2015; Barulli & Stern, 2013). Die Konstituenten der CR sind der direkten Messung nicht zugänglich und werden über Proxy-Variablen wie Bildung, Beruf, kognitiv anregende und soziale Freizeitaktivitäten erfasst. Valenzuela & Sachdev (2006) berichten in ihrer Metaanalyse mit 20 Kohortenstudien und einem Median-Follow-up nach über 7 Jahren von einem um 46 % reduzierten Demenzrisiko in Populationen mit einer hohen Ausprägung an Bildungsgrad, Berufskomplexität und mental stimulierenden Aktivitäten sowie einer Verzögerung der klinischen Manifestation der Erkrankung um mehrere Jahre (Valenzuela & Sachdev, 2006; Vance et al., 2012). Bei einer hohen CR ist wiederholt die strukturelle Schädigung des Gehirns bei vergleichbarem kognitiven Status stärker ausgeprägt, wobei der kognitive Abbau nach der Diagnosestellung rascher erfolgt. Die aufgebaute Resilienz scheint den kognitiven Funktionsverlust so lange hinauszögern zu können, bis ein nicht zu kompensierender Schädigungsgrad erreicht ist und sich die Symptomatik immer stärker dem strukturellen Schaden angleicht. Das aktive Modell sieht die CR nicht als eine statische Größe, sondern als einen kumulativen, lebenslangen Aufbauprozess mit aktiv formbaren, protektiven Einflussmöglichkeiten auf den Erhalt kognitiver Leistungen.

Während die Wirkung kognitiv stimulierender Lebensgestaltung anfänglich nur bei dementiell Erkrankten (Borroni, Premi, Bozzali & Padovani, 2012) untersucht wurde, konnte der positive Effekt auf die Kognition inzwischen für viele weitere Erkrankungen wie Morbus Parkinson (Hindle, Martyr & Clare, 2014; Poletti, Emre & Bonuccelli, 2011), Chorea Huntington (Bonner-Jackson et al., 2013), Humanes Immundefizienz-Virus (HIV, Foley et al., 2012), Hepatitis C (Sakamoto et al., 2013), Multiple Sklerose (Sumowski et al., 2014; Ghaffar, Fiati & Feinstein, 2012), Schlaganfall (Ojala-Oksala et al., 2012), Epilepsie (Pai & Tsai, 2005), traumatische Gehirnschädigungen (Mathias & Wheaton, 2015; Fay et al., 2010, siehe aber auch MacPherson et al., 2017), postoperative kognitive Dysfunktionen (Feinkohl, Winterer, Spies & Pischon, 2017), hepatische Enzephalopathie (Amodio, Montagnese, Spinelli, Schiff & Mapelli, 2017), aber auch für die Rekonvaleszenzphase nach einer Chemotherapie (Ahles et al., 2010) und zunehmend für den normativen Alterungsprozess nachgewiesen werden (Vance et al., 2012; Stern, 2006, 2009; Speer & Soldan, 2015).

Neueren Untersuchungen zufolge ist eher von einem Zusammenspiel ehemals als distinkt betrachteter Modelle der BR und CR auszugehen, die ähnlich der Computermetapher als Hardware und Software miteinander interagieren (Barulli & Stern, 2013; Lövdén, Wenger, Mårtensson, Lindenberger & Bäckman, 2013; Scarmeas & Stern, 2003; Jagust & Mormino, 2011).

## 2.1 Komponenten der kognitiven Reserve

Im folgenden Kapitel werden gemäß der vorausgegangenen Literaturrecherche und theoretischen Überlegungen sechs zum Aufbau der CR beitragende Komponenten (Bildung, Beruf, Bilingualismus, Instrumentalunterricht, soziale Freizeitaktivitäten und kognitive Freizeitaktivitäten) vorgestellt und als solche begründet.

### *Bildung*

Der Bildungsgrad ist die am häufigsten verwendete Proxy-Variable zur Schätzung der CR. Der Zusammenhang zwischen Bildung und AD gilt als robust und wurde in zahlreichen Quer- wie Längsschnittstudien, klinischen und allgemeinen Settings sowie unter verschiedenen Populationen mit dem Ergebnis eines höheren Demenzrisikos bei Personen geringen Bildungsgrades, als konsistent nachgewiesen (Caamaño-Isorna, Corral, Montes-Martínez & Takkouche, 2006). In einer Metaanalyse zur Erholungsfähigkeit nach einer traumatischen Hirnverletzung war ein hoher Bildungsgrad in 85 % der ausgewerteten Studien mit besserer kognitiver Leistung assoziiert (Mathias & Wheaton, 2015). Obwohl der mittlere Effekt als klein bis mittelgroß eingestuft wurde, war der Zusammenhang positiv und hoch signifikant ( $p < .001$ ). Ein umfangreiches systematisches Review mit einer Metaanalyse sowie einem qualitativen Review (Meng & D'Arcy, 2012) mit über 133 Querschnitt-, Fallkontroll- und Kohortenstudien und insgesamt 437477 Personen berichtet ein konsistent höheres Demenzrisiko für gering gebildete Personen mit einem Odds Ratio (OR) von 2.61 (95 % KI 2.21–3.07) in Prävalenz- und 1.88 (95 % KI 1.51–2.34) in Inzidenzstudien. Entsprechend der CR-Hypothese wiesen höher gebildete Personengruppen zudem initial eine stärkere Neuropathologie auf, die sich jedoch nicht in schlechterer kognitiver Leistung manifestierte. Erst mit dem Erreichen eines nicht kompensierbaren Degenerationsgrades zeigte sich ein rapider Leistungsabfall (Andel, Vigen, Mack, Clark & Gatz, 2006; Hall et al., 2007). Hall et al. (2007) untersuchten bei der jährlichen Follow-up-Testung den Zusammenhang zwischen Bildungsjahren und Gedächtnisleistung (mittels Buschke Selective Reminding Test) vor und nach der Demenzdiagnose an 117 Personen der Bronx-Aging-Längsschnittstudie. Jedes zusätzliche Jahr an Schulbildung verzögerte die Rate der Leistungsabnahme um 0.21 Jahre vor der Demenzdiagnose und beschleunigte diese ab dem Diagnosezeitpunkt um 0.1 Testpunkte pro Bildungsjahr. Entsprechend der CR-Hypothese waren mehr Bildungsjahre (BJ) mit mehr Follow-up-Untersuchungen vor der

Diagnosestellung assoziiert, d. h. die ersten Leistungseinbußen traten zeitnah zum Diagnosezeitpunkt auf (16 BJ ~ 3.82 Jahre vor Diagnose; 9.5 BJ ~ 5.19 Jahre; 4 BJ ~ 6.35 Jahre). Nach der Diagnosestellung jedoch ließ sich für hochgebildete Personen ein beschleunigter Leistungsabbau verzeichnen, was für den Zusammenbruch der ehemals erfolgreichen Kompensationsmechanismen spricht.

Unabhängig davon, ob der Bildungsgrad ein unabhängiger Risikofaktor für die Demenzentwicklung oder nur für die Ausprägung der klinischer Symptomatik ist, ist seine präventive Rolle für den Erhalt kognitiver Leistungen und damit die Aufrechterhaltung der Lebensqualität offensichtlich (Caamaño-Isorna et al., 2006).

### *Beruf*

Jeden Tag verbringen viele Menschen mehrere Stunden in der Erwerbsarbeit, die durch ihre Regularität und ihren hohen zeitlichen Anteil einen wichtigen Beitrag zum Aufbau der CR leisten kann. Berufliche Anforderungen unterscheiden sich stark im Grad ihrer Komplexität und dem Ausmaß der kognitiven Stimulation des Gehirns. Entsprechend der CR-Hypothese ist folglich anzunehmen, dass Personen mit mental herausfordernden, komplexen Arbeitsinhalten eine vergleichsweise höhere CR aufbauen und damit einen geringeren kognitiven Leistungsabbau sowie ein geringeres Risiko für die Inzidenz einer Demenzerkrankung aufweisen sollten.

Tatsächlich wurden in einer Reihe von Quer- und Längsschnittstudien positive Assoziationen zwischen anspruchsvollen mentalen Berufsanforderungen sowie einer hohen Berufskomplexität und der späteren kognitiven Funktionsfähigkeit gefunden (Pool et al., 2016; Nexø, Meng & Borg, 2016; Fisher et al., 2014; Correa Ribeiro, Lopes & Lourenço, 2013; Adam et al., 2013; Then et al., 2014). Komplexe Arbeitsbedingungen sind mit besserer kognitiver Leistung vor dem Eintritt in das Rentenalter und mit geringerem kognitiven Leistungsabbau im Rentenalter assoziiert (Fisher et al., 2014). Schooler, Mulatu & Oates (1999) berichten, dass komplexe Arbeitsbedingungen sowohl bei jüngeren als auch bei älteren Arbeitnehmern das intellektuelle Funktionsniveau steigern, dieser Effekt bei älteren Arbeitnehmern jedoch im Sinne der CR-Hypothese durch den kumulativen lebenslangen Aufbau und die kognitive Resilienz der CR deutlich stärker ausgeprägt sei.

In einer Metaanalyse (Valenzuela & Sachdev, 2006) zeigten neun von zwölf Studien zudem einen protektiven Effekt der beruflichen Tätigkeit gegenüber demenzbedingten Neuropathologien, woraus ein um 44 % geringeres Demenzrisiko für Personen mit einem



chemals hohen beruflichen Status errechnet werden konnte. Ein Effekt, der auch nach der Kontrolle der Kovariablen Alter und Bildung bestehen blieb. Then et al. (2014) hebt insbesondere die hohe Berufskomplexität bei der Arbeit mit Menschen (Karp et al., 2009; Kröger et al., 2008; Andel et al., 2005) und Daten (Karp et al., 2009; Andel et al., 2005) als protektiv gegenüber kognitivem Abbau und Demenz hervor.

Ein weiterer Befund, der die Rolle des Berufs als einer Komponente der CR stützt, stammt u. a. von Boots et al. (2015). Für 323 Probanden wurden Berufskomplexitätsscores (hins. Personen, Daten und Dingen) ermittelt, die mit der Ausübungsdauer der entsprechenden Berufe gewichtet und zu einem Berufskomplexitätsscore zusammengefasst wurden. Ein hoher Komplexitätsscore war auch nach Kontrolle diverser Einflussvariablen bei einer vergleichbaren kognitiven Funktionsfähigkeit mit einem geringeren hippocampalen Volumen und einem höheren Grad an Gesamthirnatrophie während der strukturellen Magnetresonanztomographie (MRT) assoziiert. Diese Beobachtung konnte von Ferrari et al. (2014) unter Verwendung der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) gestützt werden. Bei Personen, die in hoch komplexen Berufen gearbeitet haben, ist entsprechend der CR-Hypothese ein höherer Grad an Neuropathologie erforderlich, um symptomatisch zu werden. In ähnlicher Weise konnten Ghaffar et al. (2012) an einer Stichprobe von 72 Multiple-Sklerose-Patienten protektive Effekte des Berufsstatus nachweisen, der sich unabhängig vom Atrophieausmaß und prämorbidem Intelligenzquotienten (IQ) als ein signifikanter Prädiktor für die mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit, Gedächtnisleistung sowie Leistung in exekutiven Funktionen erwies.

### *Bilingualismus*

Das Beherrschen und das regelmäßige Anwenden einer weiteren Sprache erfordern eine hohe Aufmerksamkeit und gleichzeitige Inhibition der Parallelsprache. Flüssig sprechende Bilinguale zeigen Untersuchungen zufolge eine latente Aktivierung beider Sprachen, ebenso wie eine Interaktion zwischen diesen beiden, auch wenn der Kontext den Gebrauch von nur einer Sprache erfordert (De Groot, 2013; Bialystok, Craik & Luk, 2012). Die fortwährende Notwendigkeit der Inhibitionskontrolle (Inhibitory Control Model, Green, 1998; Bilingual Interactive Activation Model (BIA+), Dijkstra & van Heuven, 2002), birgt für bilinguale Personen sowohl Vor- wie Nachteile. Konsistent zeigen sich auf der einen Seite reduzierte lexikale Fertigkeiten für jede Einzelsprache im Vergleich zu monolingualen Personengruppen (Bialystok et al., 2012), wie z. B. ein altersunabhängig geringerer Wortschatz (Bialystok et

al., 2001, Bialystok, Luk, Peets & Yang 2010, Bialystok & Luk, 2012), langsamere und fehleranfällige Benennung von Bildern (Gollan, Montoya, Fennema-Notestine & Morris, 2005; Roberts, Garcia, Desrochers & Hernandez, 2002), ein verzögertes Wortverständnis und langsamere Wortproduktion unabhängig von bevorzugter Sprache (Bialystok, Craik, Green, & Gollan, 2009; Ivanova & Costa, 2008) sowie eine geringere verbale Flüssigkeit (Portocarrero, Burright & Donovanick, 2007; Gollan & Ferreira, 2009). Angefangen mit dem Experiment von Pearl und Lambert (1962), konnten andererseits dem Bilingualismus Vorteile in exekutiven Kontrollleistungen, wie Inhibition, Aufmerksamkeit, Monitoring, Arbeitsgedächtnis und der Aufgabenwechselleistung zugeschrieben werden (Coderre, Van Heuven & Conklin, 2013, Stroop-Aufgabe; Bialystok, Craik, Klein & Viswanathan, 2004, Simon-Aufgabe; Tao, Marzecová, Taft, Asanowicz & Wodniecka, 2011, Attention Network Test; Prior & MacWhinney, 2010, Aufgabenwechselparadigma u. a.) - und das sowohl für durch Bildung und andere Umweltfaktoren benachteiligte und unbenachteiligte Kinder (Carlson & Meltzoff, 2008; Engel de Abreu, Cruz-Santos, Tourinho, Martin & Bialystok, 2012), junge Erwachsene (Bialystok, Craik & Luk, 2008; Vega-Mendoza, West, Sorace & Bak, 2015) als auch für ältere und demenzgefährdete Personen (Bialystok et al., 2004; Bialystok, Craik & Ryan, 2006; Grant, Dennis & Li, 2014; Bialystok et al., 2012, siehe aber auch Paap & Greenberg, 2013; Kousaie & Phillips, 2012). Insbesondere Kinder sowie ältere Erwachsene profitieren von der Zweisprachigkeit, während im jungen Erwachsenenalter nur unter bestimmten Experimentalbedingungen mit erhöhter Aufgabenschwierigkeit, positive Effekte zu beobachten sind (Bialystok, 2006; Costa, Hernández, Costa-Faidella & Sebastián-Gallés, 2009). Es wird vermutet, dass im jungen Erwachsenenalter viele weitere kognitiv anregende Aktivitäten den Anteil bilingualer Stimulation überschatten.

Graves et al. (1999) untersuchte verschiedene kulturelle Einflussfaktoren auf Kognition und pathologische Prozesse an einer Stichprobe von aus Japan stammenden Amerikanern. Das geringste Risiko für den kognitiven Abbau war eine in Japan verbrachte frühe Kindheit sowie das zum Englischen zusätzliche Beherrschen der mündlichen sowie schriftlichen japanischen Sprache (Guzmán-Vélez & Tranel, 2015). Es folgten weitere Untersuchungen, die den protektiven Effekt des Bilingualismus auf den Erhalt kognitiver Leistungen angesichts altersbedingter und pathologischer Abbauprozesse stützten und die Rolle am Aufbau der CR bekräftigten. Bialystok, Craik & Freedman (2007) untersuchten 184 Personen mit einer Demenzdiagnose von denen 93 Patienten spätestens seit dem frühen Erwachsenenalter parallel zur Muttersprache regelmäßig eine zweite Sprache nutzten. Das Auftreten erster Symptome lag für bilinguale Personen 4.1 Jahre später als für monolinguale Patienten. Auch

nach Kontrolle von Beruf und Bildungsjahren, die für Bilinguale insgesamt signifikant geringer ausfielen (12.4 Jahre vs. 10.8 Jahre), blieb die zeitliche Differenz signifikant. Bilinguale Patienten waren 3.2 Jahre älter zum Zeitpunkt des ersten Klinikbesuchs, während das Intervall zwischen dem Auftreten erster Symptome und dem erstmaligen Klinikbesuch für Bilinguale marginal kürzer ausfiel (3 Jahre vs. 3.8 Jahre). Ein bedeutsamer Unterschied in der Progression der Erkrankung konnte jedoch nicht festgestellt werden. Craik, Bialystok & Freedman (2010) untersuchten weitere 211 AD-Patienten (102 bilingual, 109 monolingual) und errechneten nach Kontrolle von Bildung, Beruf, Migrationshintergrund und kognitivem Status einen um 5.1 Jahre verzögerten Symptombeginn und eine um 4.3 Jahre spätere Diagnosestellung für bilinguale Patienten. Chertkow et al. (2010) konnten diese Ergebnisse teilweise replizieren, indem sie einen vergleichbaren Unterschied in der Differenz des Erkrankungsbeginns zwischen multilingualen und monolingualen Patienten feststellten, der jedoch für bilinguale Patienten nicht signifikant war. Alladi et al. (2017) berichten von 6 Jahren späterem Beginn der behavioralen Form frontotemporaler Demenz bei bilingualen im Vergleich zu monolingualen Patienten. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Untersuchungen unter Berücksichtigung des Migrationsstatus und weiterer Demenzformen sowie der leichten kognitiven Beeinträchtigung (MCI) (Woumans et al., 2015; Alladi et al., 2013; Bialystok, Craik, Binns, Osher & Freedman, 2014; siehe aber auch gegenteilige Befunde u. a. Lawton, Gasquioine, & Weimer, 2015; Zahodne, Schofield, Farrell, Stern, & Manly, 2014).

Insgesamt gibt es bedeutsame Unterschiede in der Definition des Bilingualismus (früher/später Erwerb; aktiver/passiver Gebrauch; geringe/hohe Sprachkenntnisse), den Studiendesigns und den verwendeten Mess- als auch Diagnoseinstrumenten, die zum Teil die Inkonsistenzen erklären können (Atkinson, 2016; Calvo, García, Manoilloff & Ibáñez, 2016). Befunde bildgebender Untersuchungen stützen die Rolle des Bilingualismus als CR-Faktor. Schweizer, Ware, Fischer, Craik und Bialystok (2012) verglichen Computertomographie-Scans (CT-Scans) von jeweils 20 mono- und 20 bilingualen Personen vergleichbarer kognitiver Leistung (Behavioural Neurology Assessment, BNA) mit einer wahrscheinlichen AD-Diagnose. Die Gehirne der Personen, die flüssig eine weitere Sprache sprachen und diese konsistent mindestens die Hälfte ihres Lebens nutzten, wiesen einen deutlich stärkeren Atrophiegrad auf. Die Personengruppen unterschieden sich jedoch nicht in der Anzahl der Bildungsjahre und weiteren Instrumenten zur Erfassung des kognitiven Funktionsniveaus (u. a. Mini Mental Status Examination, Clock Drawing Test), woraus zu schließen ist, dass gemäß der CR-Hypothese bei bilingualen Personen ein deutlich höherer Grad an

Hirnpathologie vorliegen muss, um die Krankheit symptomatisch werden zu lassen. In einer weiteren Untersuchung unter Verwendung der PET an bi- und monolingualen Patienten mit MCI und einer beginnenden AD, konnten ebenfalls für die bilinguale Gruppe stärkere neuronale Veränderungen festgestellt werden (Kowoll et al., 2016). Im Einklang mit Befunden zu anderen Komponenten der CR zeigten Bilingualisten auch nach Schlaganfällen eine bessere kognitive Leistungsfähigkeit im Vergleich zu monolingualen Patienten (Alladi et al., 2016).

Anders als die meisten anderen Faktoren der CR ist der Zweitspracherwerb viel häufiger durch Migration und weniger durch Eigenentscheidung erreicht worden (Bialystok et al., 2012).

### *Instrumentalunterricht*

Das Erlernen eines Musikinstrumentes ist ein hoch komplexer multimodaler Prozess, der eine zeitlich und hierarchisch präzise Abstimmung des Zusammenspiels auditiver, sensomotorischer und räumlich-visueller Modalitäten sowie zahlreicher kognitiver Funktionen (v.a. Langzeit- und Arbeitsgedächtnis, Verarbeitungsgeschwindigkeit, selektive Aufmerksamkeit, Monitoring, exekutive Funktionen) erfordert (Hanna-Pladdy & Gajewski, 2012; Herholz & Zatorre, 2012; Zatorre, Chen & Penhune, 2007; Miyake & Shah, 1999). Das anspruchsvolle und zeitlich langanhaltende Training hat im Sinne der CR-Hypothese das Potential zu einer ausreichend intensiven kognitiven Stimulierung des Gehirns. Mehrere Studien an Kindern zeigen nach einem ca. einjährigen Training strukturelle Veränderungen in motorischen und auditorischen Hirnarealen sowie funktionale neuronale Veränderungen (Hyde et al., 2009; Schlaug, Norton, Overy & Winner, 2005). Für professionelle Musiker im mittleren Alter konnte eine geringere frontale Volumenreduktion und erhöhte Dichte grauer Substanz im Broca-Areal beobachtet werden, die mit visuell-räumlichen Leistungen assoziiert war (Sluming et al., 2002). Gaser & Schlaug (2003) berichten u. a. von einer Zunahme des Graue-Substanz-Volumens in motorischen, auditorischen und visuell-räumlichen Hirnregionen bei Musikern sowie einem direkten Zusammenhang zwischen dem Ausmaß neuronaler Veränderungen und der Trainingsdauer sowie Professionalität des Instrumentenspiels. Weiterhin gibt es zahlreiche Hinweise auf Transfereffekte auf nicht-musikalische sensorische, motorische und kognitive Funktionen, mit Vorteilen in Bezug auf visuell-räumliche, gedächtnisbezogene, exekutive und insbesondere verbal-sprachliche Leistungen (Jäncke, 2009; White-Schwoch, Carr, Anderson, Strait & Kraus, 2013; Hanna-

Pladdy & Mackay, 2011; Hanna-Pladdy & Gajewski, 2012; Patel, 2011; Shahin, 2011; Groussard et al., 2014; Brochard, Dufour & Despres, 2004; Franklin et al., 2008; Bugos, Perlstein, McCrae, Brophy & Bedenbaugh, 2007). Es gibt einerseits die Vorstellung, dass Transfereffekte vor allem spezifische kognitive Funktionen betreffen, die auf gleiche Mechanismen zurückgreifen (bspw. auditive Prozesse in musikalischen und verbal-sprachlichen Leistungen, u. a. Dawson, 2014; Chan, Ho & Cheung, 1998). Andererseits gibt es die Vorstellung von einer generellen, unspezifischen IQ-Zunahme aufgrund der Ähnlichkeit des Instrumentalunterrichts zu schulbildenden Maßnahmen (Schellenberg, 2004, 2006), die über die Stimulierung zahlreicher kognitiver Funktionen, insbesondere der Exekutivfunktionen erfolgt (Groussard et al., 2014). So liefern Degé, Kubicek & Schwarzer (2011) empirische Evidenz für einen positiven Einfluss des Instrumentenunterrichts auf exekutive Funktionen, die ihrerseits Intelligenztestleistungen zu fördern scheinen. Rosenkranz, Williamon & Rothwell (2007) stellten zudem für Musiker eine bessere Fähigkeit zum Erlernen neuer Aufgaben fest. Die Effekte bestehen auch im höheren Alter fort, persistierten bei Unterbrechung der aktiven Instrumentennutzung (Hanna-Pladdy & Mackay, 2011; White-Schwoch et al., 2013) und scheinen sich auch beim Erwerb im späten Erwachsenenalter zu entwickeln (Seinfeld, Figueroa, Ortiz-Gil & Sanchez-Vives, 2013; Bugos et al., 2007). Insgesamt zeigen sich häufig intensitätsabhängige Vorteile mit stärkeren Transfereffekten bei zunehmender Trainingsdauer (White-Schwoch et al., 2013). Hanna-Pladdy & McKay (2011) fanden in mehreren kognitiven Tests, u. a. zur kognitiven Flexibilität signifikante Unterschiede zwischen aktiven Musikern (>10 Jahre Instrumentenerfahrung) und Nicht-Musikern im Alter zwischen 60–83 Jahren. Die kognitiven Differenzen zwischen der Gruppe der aktiven und weniger aktiven Musikern (1–9 Jahre Instrumentenerfahrung) waren zwar statistisch nicht signifikant, nahmen aber in ihrer Leistung eine mittlere Position zwischen aktiven Musikern und Nicht-Musikern ein. Die Autoren berichten eine lineare Beziehung zwischen Jahren der Instrumentenerfahrung und kognitiver Funktion im fortgeschrittenen Alter, unabhängig vom aktuellen Aktivitätsstatus. Auch bei Beginn im späten Erwachsenenalter zeigt sich eine protektive Wirkung des Instrumentalunterrichts auf kognitive Alterungsprozesse (Wan & Schlaug, 2010). Die Rolle des Instrumentalunterrichts am Aufbau der CR stützen auch Untersuchungen an Demenzerkrankten. Verghese et al. (2003) konstatierte in einer prospektiven Kohortenstudie ein reduziertes Demenzrisiko für Senioren, die ein Instrument spielten. Auch Balbag, Pedersen und Gatz (2014) berichteten nach Kontrolle des Geschlechts, Bildungsgrades und physischer Aktivität bei 27 für Demenz

und Instrumentalunterricht diskordanten Zwillingspaaren, ein reduziertes Risiko für Demenz und kognitive Einbußen mit einem OR von 0.36 (95 % KI .13–.99).

### *Soziale Freizeitaktivitäten*

Bereits frühe epidemiologische Untersuchungen fanden negative Assoziationen zwischen einer positiven und unterstützenden sozialen Integration auf der einen Seite und diversen physischen wie mentalen Gesundheitsvariablen wie Bluthochdruck, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Depressionen auf der anderen Seite (Broadhead et al., 1983, Seeman, 2001; Nicholson, 2012). Positive Interaktionen konnten zudem mit einer reduzierten physiologischen Reaktivität des endokrinen und kardiovaskulären Systems in Verbindung gebracht werden (Seeman & McEwen, 1996; Seeman, 1996, 2001), die ihrerseits mit schlechteren kognitiven Leistungsscores assoziiert ist (Seeman, Lusignolo, Albert & Berkman 2001). Reiche soziale Netzwerke haben nicht nur emotional, motivational, informativ und aktiv unterstützende Aspekte, sondern fordern durch Aufmerksamkeits-, Gedächtnis- und exekutive Anforderungen kognitive Funktionen heraus (Ybarra et al., 2008). Verschiedene Merkmale sozialer Aktivität wie die soziale Integration (Ertel, Glymour & Berkman, 2008; Zunzunegui et al., 2003), emotionale Unterstützung (Seeman et al., 2001, 2011), soziales Engagement (Barnes et al., 2004), Größe sozialer Netzwerke und Häufigkeit sozialer Kontakte (Barnes, De Leon, Wilson, Bienias & Evans, 2004; Seeman et al., 2001, 2011; Bassuk, Glass & Berkman, 1999; Zunzunegui, Alvarado, Del Ser & Otero, 2003) konnten in einer Reihe von quer- und längsschnittlichen Untersuchungen mit einer geringeren Abnahme kognitiver Funktion und einer besseren Leistung in verschiedenen kognitiven Domänen wie bspw. der verbalen Flüssigkeit, exekutiven Funktionen, Verarbeitungsgeschwindigkeit und Gedächtnis in Verbindung gebracht werden (Seeman et al., 2011; Hultsch, Hertzog, Small & Dixon, 1999; Newson & Kemps, 2005, siehe aber auch Sörman et al., 2013).

In einer prospektiven Studie mit einem Follow-up nach 6 Jahren untersuchten Ertel et al. (2008) an 16 638 Personen im Alter von >50 Jahren den Zusammenhang zwischen der Gedächtnisfunktion und fünf Domänen sozialer Aktivität (Beziehungsstatus, ehrenamtliche Tätigkeiten, mindestens wöchentliche Kontakte zu Eltern, Kindern und Nachbarn). Eine hohe soziale Integration war mit einer geringeren Leistungsver schlechterung assoziiert, insbesondere in der Subpopulation mit weniger als 12 Bildungsjahren und kardio-vaskulären Erkrankungen. Die Abnahmerate der Gedächtnisfunktion in der Subpopulation mit der höchsten sozialen Integration war um mehr als die Hälfte geringer im Vergleich zur

Subpopulation mit dem geringsten sozialen Integrationsscore. Auch Seeman et al. (2001) konnten in einer Kohortenstudie an 1 189 kognitiv gesunden älteren Personen einen positiven Zusammenhang zwischen kognitiver Leistung und der emotional-sozialen Unterstützung feststellen, die sich nach einer Follow-up-Periode von 7.5 Jahren und nach der Kontrolle von soziodemographischen, behavioralen, psychologischen und physiologischen Variablen als ein signifikanter Prädiktor für eine bessere kognitive Funktion erwies.

Zugleich wurde der soziale Rückzug nicht nur als ein Risikofaktor für kognitive Leistungsverschlechterung, sondern auch für Demenz beschrieben (Wang, Karp, Winblad & Fratiglioni, 2002; Nicholson, 2012; Bassuk et al., 1999; Holtzman et al., 2004). Einsame Studienteilnehmer hatten in der Untersuchung von Wilson et al. (2007) ein mehr als doppelt so hohes Demenzrisiko im Vergleich zu nicht einsamen älteren Personen. Ein unzureichendes soziales Netzwerk, insbesondere das Alleinleben ohne enge soziale Bindungen erhöhte in einer weiteren Kohortenstudie das Demenzrisiko ebenfalls um bis zu 60 % (95 % KI 1.2–2.1, Fratiglioni, Wang, Ericsson, Maytan & Winblad, 2000). Die Beachtung einer möglichen umgekehrten Kausalität ist bei Demenzdiagnosen kurz nach Studienbeginn wesentlich, da die Abnahme sozialer Aktivitäten bereits ein Symptom der Erkrankung darstellen kann. So untersuchten Wang et al. (2002) 776 pensionierte Personen, von denen 123 während der zweiten Follow-up-Periode nach 6 Jahren dementiell erkrankten, jedoch zum ersten Follow-up-Zeitpunkt (3 Jahre nach der Baselineerhebung) als kognitiv gesund eingestuft wurden. Zum Baselinezeitpunkt wurde u. a. die soziale Aktivität (kulturelle Veranstaltungen, Reisen, Brettspiele und die Partizipation in sozialen Gruppen oder Seniorenorganisationen) sowie das soziale Netzwerk (Zusammenleben mit Partner, jeweils mindestens wöchentliche und befriedigende soziale Interaktionen mit Kindern, Verwandten und/oder Freunden) erhoben. Das soziale Netzwerk, welches mit einer größeren sozialen Unterstützung im Zusammenhang stehen könnte, wurde ebenso wie weitere potentiell konfundierende Variablen wie z. B. Alter, Geschlecht, Bildung, kognitive Funktion, depressive Symptome, genetische und physisch relevante Variablen kontrolliert. Die tägliche bzw. wöchentliche soziale Aktivität war unabhängig von den ebenfalls erfassten mentalen und produktiven Aktivitäten auch unter Herausnahme des Effekts des sozialen Netzwerkes mit einem geringeren relativen Risiko (RR) = .60 (95 % KI .38–.94) für eine Demenzerkrankung assoziiert. Im Rahmen der PAQUID-Studie wurde zudem sowohl der Einfluss struktureller (z. B. Beziehungsstatus, Anzahl sozialer Kontakte) wie qualitativer Aspekte (z. B. Zufriedenheit mit Kontakten) sozialer Interaktionen auf das Demenzrisiko von 2 089 Personen untersucht, von denen 834 im Zeitraum zwischen 5 und 15 Jahren nach Studienbeginn dementiell erkrankten (Amieva et

al., 2010). Unter Beachtung zahlreicher konfundierender Variablen zeigten sich insbesondere qualitative Aspekte sozialer Interaktionen als präventiv gegenüber Demenzerkrankungen. Personen, die mit ihren sozialen Beziehungen zufrieden waren, zeigten ein um 23 % reduziertes Demenzrisiko. Weiterhin hatten Personen, die angaben in ihrem Leben mehr Unterstützung erfahren zu haben als sie selbst gegeben hatten, ein um 55 % reduziertes Demenzrisiko. Die soziale Aktivität als Komponente der CR bekräftigen weiterhin Autopsiebefunde. Bennett, Schneider, Tang, Arnold & Wilson (2006) fanden post mortem bei 89 älteren Personen ohne bekannte Demenzerkrankung zu Studienbeginn eine Assoziation zwischen AD-Pathologien und der kognitiven Funktion. Gemäß der CR-Hypothese war bei einer global deutlich stärkeren Gehirnpathologie die kognitive Funktion insbesondere für das semantische Gedächtnis und das Arbeitsgedächtnis bei Personen mit größeren sozialen Netzwerken deutlich höher ausgeprägt.

### *Kognitive Freizeitaktivitäten*

Unter kognitiv stimulierenden Freizeitaktivitäten werden Aktivitäten zusammengefasst, die unabhängig vom Beruf und Haushaltspflichten ausgeübt werden (Verghese et al., 2006) und mit mentalen Denkprozessen verbunden sind (z. B. Lesen, Brett-/Kartenspiele, Erlernen neuer Fertigkeiten). Zahlreiche Studien, darunter viele längsschnittliche Untersuchungen weisen konsistent darauf hin, dass ein Lebensstil reich an intellektuell stimulierenden Freizeitaktivitäten mit besserer kognitiver Leistung sowohl in spezifischen kognitiven Domänen, wie der Wahrnehmungsgeschwindigkeit und dem AG (u. a. Ghisletta, Bickel & Lövdén, 2006; Wilson et al., 2002; Wang et al., 2012) als auch in der globalen kognitiven Funktion einhergeht (u. a. Wang et al., 2012; Kåreholt, Lennartsson, Gatz & Parker, 2011; Wilson et al., 2002). So untersuchten unter anderem Wang et al. (2012) die kognitive Leistung von 1 463 kognitiv und physisch gesunden chinesischen Bürgern (> 65 Jahre) im Abstand von ca. 2,4 Jahren und stellten für mental aktive Personen eine geringere Abnahme in der allgemeinen Kognition, den sprachlichen Leistungen und exekutiven Funktionen fest. Entsprechend der CR-Hypothese ist eine kognitiv stimulierende Freizeitgestaltung zugleich mit einem reduzierten MCI- (Verghese et al., 2006) und Demenz-Risiko assoziiert (Wang, Xu & Pei, 2012; Akbaraly et al., 2009; Verghese et al., 2003; Carlson et al., 2008; Crowe, Andel, Pedersen, Johansson & Gatz, 2003; siehe aber auch Aartsen, Smits, Van Tilburg, Knipscheer & Deeg, 2002). In einer Stichprobe von 5 698 Teilnehmern (> 65 Jahre) errechneten Akbaraly et al. (2009) über einen Follow-up-Zeitraum von 4 Jahren nach Kontrolle von kardio-



vaskulären Risikofaktoren, depressiven Symptomen und physischem Funktionsniveau ein um 50 % reduziertes Demenzrisiko für kognitiv stimulierende Aktivitäten von mindestens zwei mal wöchentlicher Häufigkeit. In einer weiteren Untersuchung wurde ein nahestehender Informant von AD-Erkrankten gebeten, die Leseaktivität ca. 5 Jahre vor den ersten Gedächtnis- und Denkschwierigkeiten einzuschätzen (Wilson, Bennett & Gilley, 2000). Das strukturierte Interview enthielt Fragen zur täglichen Lesezeit (Bücher, Zeitschriften, Zeitungen), der ungefähren Anzahl gelesener Bücher pro Jahr, der Bücheranzahl Zuhause sowie dem Vorhandensein eines Bücherregals und Bibliotheksausweises. Es ergab sich ein positiver Zusammenhang zwischen der Leseaktivität und der kognitiven Leistung zum Baselinezeitpunkt. Zugleich beschleunigte eine höhere Leseaktivität den kognitiven Abbau innerhalb der nächsten 4 Jahre: „A premorbid reading score of 13 (90th percentile) was about 19% faster than the average rate expected for a person with a reading score of 3 (10th percentile)“ (Wilson et al., 2000, S. 1720). Für verbale Messungen lag die Abnahmerate kognitiver Leistungen für intensive Leser sogar 40 % höher im Vergleich zu Patienten mit der geringsten Leseaktivität. In der Kohortenstudie von Hall et al. (2009) an 101 im Untersuchungszeitraum (ca. 4.4 Jahre nach Studienbeginn) demenziell erkrankten 75–85 Jährigen, verzögerte ebenfalls jeder zusätzliche Tag der Teilhabe an einer zum Baselinezeitpunkt erhobenen Freizeitaktivität (Lesen, Schreiben, Kreuzworträtsel, Brett-/Kartenspiele, Gruppendiskussion und Spielen eines Instruments) den Gedächtnisverlust um 0.18 Jahre und beschleunigte diesen mit dem Beginn des fortschreitenden kognitiven Abbaus um 0.14 SRT-Punkte pro Jahr (Selective Reminding Test) für jede zusätzliche Freizeitaktivität pro Tag. Auch Hultsch et al. (1999) konnten eine Assoziation zwischen intellektuell fördernden Aktivitäten und einem geringeren Grad an kognitiven Leistungsdefiziten feststellen. Es stellte sich jedoch ähnlich wie bei der Häufigkeit sozialer Aktivitäten die Frage, ob nicht gerade kognitiv leistungsfähigere Personen intellektuell stimulierende Aktivitäten bevorzugen und im höheren Alter aufgrund der abnehmenden kognitiven Leistung reduzieren (vgl. Schooler & Mulatu, 2001; Scarmeas & Stern, 2003). Da kognitive Einbußen mehrere Jahre vor der Demenzdiagnose vorliegen (Small, Fratiglioni, Viitanen, Winblad & Bäckman, 2000; Elias et al., 2000) und sowohl die Kognition selbst als auch die Teilhabe an intellektuell herausfordernden Aktivitäten negativ beeinflussen, sind bei kurzen Follow-up-Zeiträumen kausale Aussagen nicht unumstritten. Prospektive Untersuchungen und Zwillingsstudien berichten jedoch ähnliche Ergebnisse. So erhoben Kåreholt et al. (2011) die kognitive Funktion bis zu 20 Jahre nach der Erhebung der kognitiven Freizeitaktivitäten an ursprünglich 1 643 Personen im Alter zwischen 46 und 75

Jahren. Nach der Berücksichtigung diverser konfundierender Variablen ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Teilhabe an mentalen und politischen Aktivitäten zum Baselinezeitpunkt und der Kognition im späten Lebensalter (vgl. auch Crowe et al., 2003; Verghese et al., 2003). Für 147 männliche Zwillingspaare war eine höhere kognitive Aktivität im mittleren Alter mit einem um 26 % verzögerten Demenz-Onset assoziiert (Carlson et al., 2008). Die Effekte waren robuster für monozygote Zwillingspaare, insbesondere für Träger des Apolipoproteins E4, wo theoriekonform eine verstärkte Kompensationsleistung der CR zu erwarten war. Des Weiteren konnten Scarmeas, Levy, Tang, Manly und Stern (2001) für Personen mit hohem Grad an kognitiven Freizeitaktivitäten ein signifikant geringeres Demenzrisiko auch nach Kontrolle der zum ersten Testzeitpunkt erhobenen kognitiven Leistung, der mit Freizeitaktivitäten interferierenden gesundheitlichen Einschränkungen, zerebrovaskulären Erkrankungen und Depressionen feststellen.

Wie für andere Komponenten der CR zeigte sich der positive Effekt kognitiver Freizeitaktivitäten auch im Rahmen anderer Erkrankungen, wie bspw. der Multiplen Sklerose. „Patients with MS [multiple sclerosis] who engaged in more premorbid cognitive leisure were able to withstand more severe brain atrophy before showing cognitive decline” (Sumowski, Wylie, Gonnella, Chiaravalloti & Deluca, 2010, S. 1430). Auch war die regelmäßige Teilhabe an intellektuellen Aktivitäten unter anderem mit einem geringeren Risiko einer Demenz nach Schlaganfall assoziiert (PSD, poststroke dementia, Wong et al., 2016).

## 2.2 Erfassung der kognitiven Reserve

Die kognitive Reserve ist ein hypothetisches Konstrukt, welches indirekt über Proxy-Variablen erfasst wird (Guzmán-Vélez & Tranel, 2015; Satz, Cole, Hardy & Rassovsky, 2011; Jones et al., 2011). Es besteht aktuell kein Konsens darüber, wie viele Variablen in welcher Gewichtung zum übergeordneten Reservekonstrukt beitragen (Harrison et al., 2015). Studien zur CR unterscheiden sich in der Art und Anzahl verwendeter Proxy-Variablen, sodass teilweise völlig unterschiedliche Maße ohne einen Überschneidungsbereich als CR beschrieben werden und oftmals nur eine einzige Variable zur Schätzung verwendet wird (Roselli et al., 2009; Le Carret et al., 2005; Caamaño-Isorna et al., 2006; Meng & D’Arcy, 2012). Auch gibt es keine Einigkeit darüber, ob die erfassten Variablen separat betrachtet oder zu einem Maß zusammengefasst werden sollten und wenn ja, auf welche Weise (Siedlecki et al., 2009; Speer & Soldan, 2015; Jones et al., 2011).

Ein weiteres Problem stellt die unterschiedliche Operationalisierung der am häufigsten genutzten Variablen dar, was die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studienergebnisse erschwert. So erfolgt zwar die Erfassung des Bildungsgrades meist über die absolute Anzahl der Bildungsjahre (u. a. Bialystok et al., 2007; Scarmeas et al., 2003), häufig aber auch über Eingruppierungsskalen mit unterschiedlich vielen Antwortalternativen (z. B. <5, 6–9, 10–12 und >12 Jahre, Le Carret et al., 2005; <10, 10–12 und >12 Jahre, Christensen, Anstey, Parslow, Mackinnon & Sachdev, 2006; <5, 6–8, >8, Ngandu et al., 2007) oder über dichotome Skalen (</> 8 Jahre, Roselli et al., 2009; </> 12 Jahre, Tucker-Drob, Johnson & Jones, 2009) mit auffallend unterschiedlicher Definition von hoher bzw. niedriger Bildung (Caamaño-Isorna et al., 2006). Teilweise wird nur der Bildungsabschluss erhoben (Solé-Padullés et al., 2009), weiterbildende Kurse mitbetrachtet (Valenzuela & Sachdev, 2006) oder die Literalität zur Schätzung des Bildungsgrades erfasst (für eine Übersicht siehe Nucci et al., 2012). Ein ähnliches Bild bietet sich bei der Erfassung der Berufstätigkeit, wo unterschiedliche Skalen und Klassifikationsmerkmale herangezogen werden (z. B. Berufsstatus, Einkommensklasse vs. Berufskomplexität, allgemein oder aufgespalten nach der Komplexität der Arbeit mit Dingen, Daten oder Menschen). Auch die Wahl des betrachteten Berufes variiert (aktueller Beruf vs. der Beruf mit der längsten Verbleibdauer). Für die Freizeitaktivitäten werden je nach Fragestellung und Konzeptverständnis entweder etablierte oder selbst entwickelte Listen und Fragebögen sowie einzelne Items verwendet, die sich in der Art und Anzahl der Items sowie der Definition relevanter Zeiträume und Häufigkeitsangaben (wöchentlich vs. monatlich, Harrison et al., 2015) unterscheiden. Auch die Kategorisierung ist uneinheitlich (Subsumierung sozialer Aktivitäten zu Freizeitaktivitäten vs. jeweils separate Betrachtung). Somit ist nicht endgültig geklärt, welche Freizeitaktivitäten oder welche spezifischen Aspekte dieser Aktivitäten den größten positiven Effekt auf den Erhalt der kognitiven Funktion haben (Harrison et al., 2015).

Die häufige Schätzung der CR über Intelligenzscores, in der Regel über den Wortschatz-Test des WAIS und den NART-IQ-Score, wird von einigen Autoren, ebenso wie in der vorliegenden Arbeit, abgelehnt (Leon, García-García & Roldan-Tapia, 2014; Nucci et al., 2012). Das Konzept der Intelligenz ist an intellektuelle Leistung gekoppelt und wird über direktes aktives Handeln in einer Leistungssituation erfasst. Dem CR-Konzept liegt kein primärer Leistungsgedanke zugrunde, wodurch deren Schätzung keine Leistungserfassung erfordert, wenngleich sie mit dieser korreliert ist (Nucci et al., 2012).

Die CR als Resultat kognitiv stimulierender Lebenserfahrungen (Stern, 2002), stellt auch die zum Teil unselektierte Verwendung einzelner Freizeitaktivitäten (z. B. Gartenarbeit),

sportlicher Aktivitäten sowie der Ernährungsgewohnheiten als Schätzungen der CR in Frage. Darüber hinaus sind in der Literatur inhaltliche Abwandlungen des übergeordneten CR-Konzepts zu finden (z. B. Zihl, Fink, Pargent, Ziegler & Bühner, 2014; Reed et al., 2010; Pinto & Tandel, 2016).

Es gab mehrfach Bemühungen, einheitliche Erfassungsinstrumente zu etablieren, unter anderem die Cognitive Reserve Scale (CRS, Leon, Garcia & Roldan-Tapia, 2011), den Lifetime of Experiences Questionnaire (LEQ, Valenzuela & Sachdev, 2007), den Cognitive Reserve Questionnaire (CRQ, Rami et al., 2011) sowie den Cognitive Reserve Index questionnaire (CRIq, Nucci, Mapelli & Mondini, 2012), die sich bisher vermutlich entweder aufgrund von Mindestaltervorgaben, einer zu engen (Fokussierung nur auf die Freizeitbereiche) bzw. zu breiten (Einbezug kognitiv wenig stimulierender Tätigkeiten, wie z. B. der Haustierpflege oder des sozioökonomischen Status sowie physischer Aktivität) Konzeptdefinition oder aufgrund von Sprachbarrieren und der kulturellen Heterogenität noch nicht durchsetzen konnten.

Nichtsdestotrotz liegt dem CR-Konzept eine solide epidemiologische Forschungsbasis zugrunde, die trotz unterschiedlicher Erfassungsmethoden und konzeptueller Ungenauigkeiten in den letzten Jahrzehnten bereits einen großen Schritt zum Verständnis des Erhalts der kognitiven Leistungsfähigkeit beigetragen hat und noch beitragen wird.

### **2.3 Neuronale Korrelate der kognitiven Reserve**

Die anfängliche strikte Trennung in funktionale (CR, Software) und strukturelle Reserveanteile (BR, Hardware) musste im Laufe der Zeit zumindest teilweise einer synergetischen Sichtweise weichen (Stern, 2012; Bartrés-Faz & Arenaza-Urquijo, 2011; Barulli & Stern, 2013). Tierexperimentelle Untersuchungen an Mäusen legen sowohl eine Assoziation zwischen anregenden Umweltbedingungen (physisch, sozial und kognitiv) und der Kognition als auch funktionalen und strukturellen neuronalen Veränderungen, wie bspw. einer höheren dendritischen Dichte und Neurogenese im Hippocampus nahe (Pham, Winblad, Granholm & Mohammed, 2002; Kempermann, Kuhn, & Gage, 1997; Gelfo et al., 2017). Im Einklang mit den Annahmen zur kognitiven Plastizität, ist davon auszugehen, dass sowohl auf kognitiver (z. B. Erwerb neuer Fertigkeiten und Strategien) als auch auf neuronaler Ebene eine kontinuierliche Anpassung an Umweltbedingungen stattfindet, sodass die CR sowohl über indirekte kompensatorische als auch direkte neuroprotektive Wirkmechanismen zum

Schutz und zur Aufrechterhaltung kognitiver und neuraler Funktionen wirken kann (Arenaza-Urquijo, Wirth & Chételat, 2015; Jones et.al., 2011; Meng & D'Arcy, 2012). Es wird vermutet, dass neuroprotektive Mechanismen vor allem in gesunden bzw. prodromalen Phasen zum Tragen kommen, während kompensatorische Mechanismen in späteren Erkrankungsstadien relevant sind (Arenaza-Urquijo et al., 2015).

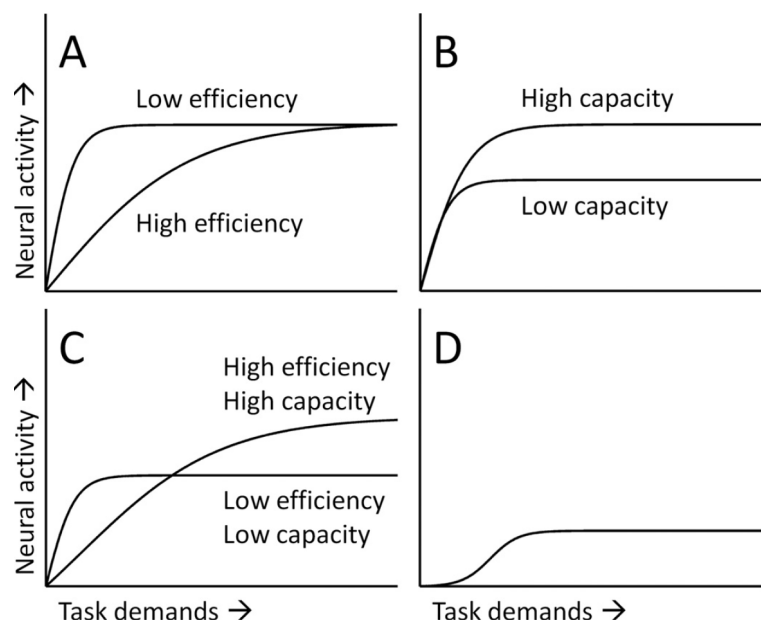
Auch wenn nicht endgültig geklärt ist, welche konkreten Wirkmechanismen diesen protektiven Effekten der CR zugrunde liegen (Stern, 2012; Esiri & Chance, 2012), werden immer mehr plausible Wirkmechanismen auf molekularer, zellulärer und kortikaler Ebene, wie z. B. die Erhöhung des Phosphokreatinlevels, die Neuro-, Synapto- und Dendritogenese sowie die funktionale Reorganisation neuronaler Netzwerke, diskutiert (Valenzuela, Breakspear & Sachdev, 2007; Valenzuela & Sachdev, 2006). Scarmeas & Stern (2003) stellten einerseits die Vermutung auf, dass ein kognitiv aktiver Lebenswandel im neokortikalen Assoziationskortex die synaptische Dichte erhöhen könnte, wodurch es zu effizienterem Gebrauch intakter Neuronen kommt, welche die Funktionseinbußen anderer Regionen kompensieren. Andererseits könnte die CR über die synaptische Aktivität bzw. die Effizienz synaptischer Schaltkreise ohne einen Einfluss auf die Neuronen- und Synapsenzahl wirken. Diskutiert wurde darüber hinaus die Möglichkeit eines aufgabenunspezifischen generalisierten neuralen CR-Netzwerkes (Bartrés-Faez & Arenaza-Urquijo, 2011; Stern 2012). In tierexperimentellen Studien wurde zudem die Rolle des noradrenergen Systems (Locus caeruleus) als eines potentiellen Mechanismus der CR untersucht (Xu, Yu, Tan & Tan, 2015). Es gibt Vermutungen, dass die CR über eine Hochregulierung des noradrenergen Systems arbeitet (Robertson, 2013), welches die neurale Reserve und neurale Kompensation auf vielfältige Weise aufbaut (Guzmán-Vélez & Tranel, 2015).

Die neurale Reserve und Kompensation wurden von Stern (2009, 2013) als zwei Grundformen der neuralen Implementation der CR diskutiert (Steffener & Stern, 2012; Barulli & Stern, 2013). Die neurale Reserve betrifft die interindividuelle Variabilität in der Effizienz und Kapazität der primären, aufgabenrelevanten Gehirnnetzwerke, die sich über die Lebensspanne hinweg infolge unterschiedlicher Lebenserfahrungen und unabhängig von eventuellen späteren Pathologien entwickeln (Siedlecki et al., 2009; Barulli & Stern, 2013). In Abhängigkeit von der CR kann dasselbe Netzwerk unterschiedlich effizient genutzt werden, sodass bei einer hohen CR zur Erbringung vergleichbarer Leistung eine geringere Netzwerkaktivierung ausreichend ist (Abb. 1A). Steigt die objektive Aufgabenschwierigkeit, nimmt die Netzwerkaktivierung zu bis eine individuelle Kapazitätsgrenze erreicht ist. Bei

Personen mit einer hohen CR wird eine höhere Kapazitätsgrenze angenommen, die auf vergleichsweise höheren Schwierigkeitsstufen ausgeschöpft wird (Abb. 1B).

Die Effizienz und die Kapazität des primären Netzwerkes nehmen infolge von Alterungsprozessen und neuronalen Veränderungen ab. Das Netzwerk sollte jedoch in Abhängigkeit von der CR unterschiedlich resistent gegenüber Störungen sein (Steffener & Stern, 2012; Stern et al., 2012; Barulli & Stern, 2013). Effizienz- und Kapazitätsveränderungen können gleichzeitig erfasst werden (Abb. 1C, Steffener & Stern, 2012).

Eine weitere Möglichkeit ist das Ausweichen auf alternative Netzwerke (neurale Kompensation, Stern, 2009; 2012; Steffener & Stern, 2012), die bei einer hohen CR flexibler genutzt und die Arbeit primärer Netzwerke übernehmen könnten. Die kompensatorische Nutzung von Hirnstrukturen und Netzwerken, die normalerweise nicht von gesunden Personen zur Aufgabenlösung eingesetzt werden, ist vor allem bei hirnorganischen Schädigungen von Bedeutung. Ein alternatives Netzwerk wird ab einem bestimmten Schwierigkeitsgrad dann hinzugezogen, wenn das primäre Netzwerk aufgrund mangelnder Kapazität oder Schädigung seine Kapazitätsgrenze erreicht hat (Abb. 1D).



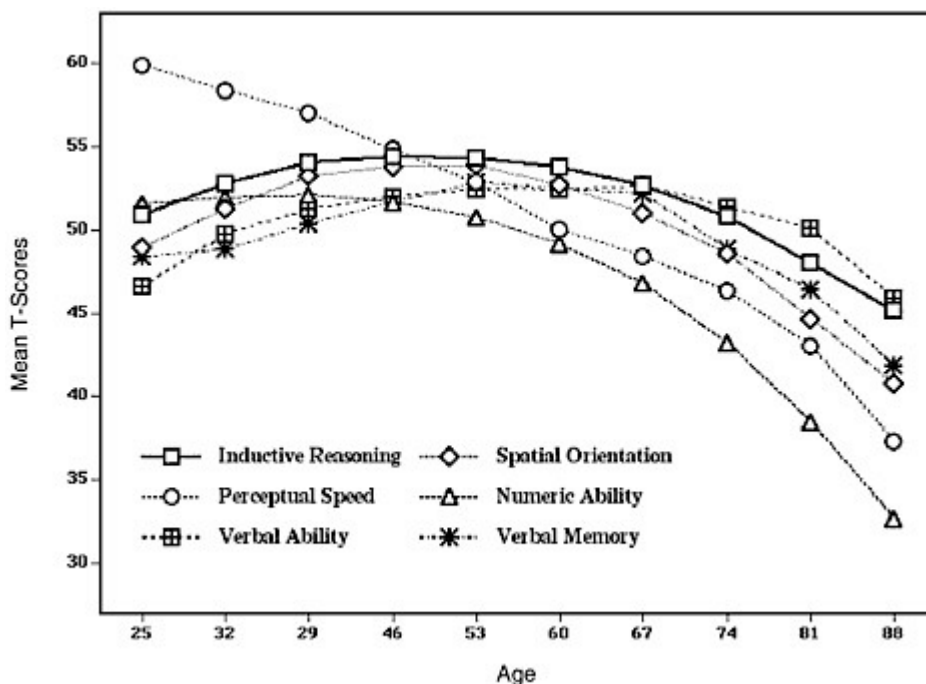
**Abbildung 1 a-d.** Mechanismen der kognitiven Reserve nach Steffener & Stern (2012)

*A* = Hohe vs. geringe neuronale Aktivität im primären Netzwerk bei steigender Aufgabenschwierigkeit (Effizienz); *B* = Maximal mögliche neuronale Aktivität des primären Netzwerkes bei steigender Anforderung (Kapazität); *C* = Unterschiedliche Grade an Effizienz und Kapazität bei steigender Aufgabenschwierigkeit; *D* = Kompensatorische, alternative neuronale Aktivität: Aktivität im primären Netzwerk steigt trotz Schwierigkeitszunahme nicht mehr an

Eine gelungene Kompensation trägt zur Leistungsaufrechterhaltung bei, eine misslungene Rekrutierung alternativer Netzwerke zu einer Leistungsver schlechterung (Dedifferenzierung). Insgesamt wird angenommen, dass eine hohe CR trotz altersbedingter oder pathologischer neuronaler Veränderungen eine höhere neurale Effizienz und Kapazität aufrechterhalten kann, zu einer flexiblen und erfolgreichen Kompensation in der Lage ist bzw. eine nicht zielführende, leistungsdrosselnde Aktivierung alternativer Netzwerke vermeiden kann (Barulli & Stern, 2013).

### 3 Kognitive Leistungsfähigkeit und der Alterungsprozess

„Variabilität gehört zu den wesentlichen Merkmalen intellektueller Leistungsfähigkeit im Alter“ (Lindenberger, 2006, S.1; vgl. Fabiani, 2012; Hedden & Gabrieli, 2004). Während einige Personen bis ins hohe Lebensalter die geistigen Fähigkeiten aufrechterhalten und steigern können, ist bei anderen ein deutlicher Leistungsrückgang zu verzeichnen (Buckner, 2005; Schaie, 2010; Lindenberger, 2006). Gruppenübergreifend lässt sich für viele kognitive Funktionen u. a. Gedächtnis, Verarbeitungsgeschwindigkeit und räumliche Fähigkeiten eine altersassoziierte Leistungsabnahme beobachten (Salthouse, 2004; Fabiani, 2012), wobei die Abnahmeraten und Leistungspeaks nicht nur interpersonell, sondern auch über verschiedene kognitive Domänen und Altersintervalle hinweg variieren (Schaie, 2004, 2010; Abrams, 2009; Salthouse, 2004, siehe Abb. 2).



**Abbildung 2.** Längsschnittliche Veränderung von sechs kognitiven Fähigkeiten zwischen dem 25. und 88. Lebensjahr (nach Schaie, 2004, S. 55)

Wann erste Abnahmen kognitiver Funktionen zu verzeichnen sind, ist nicht einfach zu beantworten. Salthouse (2009, 2004) berichtet im Querschnittsvergleich jedoch bereits zwischen dem 20. und 30. Lebensjahr von beginnenden kognitiven Defiziten, insbesondere in der Verarbeitungsgeschwindigkeit. Singh-Manoux et al. (2012) untersuchten in einer prospektiven Kohortenstudie fünf Altersgruppen zwischen 45 und 70 Jahren. Für Gedächtnis,



schlussfolgerndes Denken, die phonemische und semantische Flüssigkeit waren kognitive Defizite auch in der jüngsten untersuchten Gruppe (45–49 Jahre) messbar, während der Wortschatz sich als unabhängig von Alterseinflüssen zeigte. Die meisten Autoren gehen jedoch für die meisten kognitiven Leistungen von dem Erreichen einer individuellen Asymptote im frühen mittleren Alter aus, einer nachfolgenden Plateauphase relativer Leistungsstabilität bis um das 60. Lebensjahr herum (Plassman et al., 1995; Ronnlund et al., 2005; Lövdén et al., 2004; Schaie, 2005, 2010) und einer kontinuierlichen moderaten Leistungsabnahme bis in die frühen Achtzigerjahren mit einem deutlichen Leistungsabfall in den Jahren vor dem Ableben (Aartsen, et al., 2002; Schaie, 2010; Abrams, 2009).

Ein weiteres klassisches Muster in querschnittlichen Untersuchungen ist eine basierend auf dem Zwei-Komponenten-Ansatz (Horn & Cattell, 1967) beobachtete monotone Abnahme vor allem fluider Fähigkeiten (u. a. Arbeitsgedächtnis, Verarbeitungsgeschwindigkeit, schlussfolgerndes Denken) bei gleichbleibenden oder gar zunehmenden kristallinen Leistungen (z. B. Wortschatz, Wissen). Im späten und sehr späten Erwachsenenalter kommt es interindividuell zu einer Dedifferenzierung intellektueller Fähigkeiten (Balinsky, 1941) mit einer Konvergenz der fluiden und kristallinen Altersgradienten und einer Zunahme der Korrelationen zwischen den einzelnen intellektuellen Fähigkeiten. In querschnittlichen Untersuchungen fällt die Abnahme kognitiver Funktionen meist stärker aus als in Längsschnittuntersuchungen (Abrams, 2009; Nilsson, Sternäng, Rönnlund & Nyberg, 2009; Salthouse, 2009). Einer der Gründe ist, dass „die kognitive Leistungsfähigkeit wenige Jahre vor dem Tod in der Regel abnimmt und die Sterbewahrscheinlichkeit mit zunehmendem Alter steigt“ (Kotter-Grühn et al, 2010, S. 661). Dadurch leisten ältere Personen mit niedrigeren kognitiven Leistungen einen im Vergleich zum Querschnitt reduzierten Beitrag zur Schätzung der längsschnittlichen Veränderungen (Kotter-Grühn et al, 2010). Zudem sollten Selektions-, Kohorten- und Retest-Effekte nicht außer Acht gelassen werden (Salthouse, 2009).

Aus theoretischer Sicht stellte sich die Frage, ob Defizite in bestimmten kognitiven Funktionen denen in anderen kognitiven Domänen ursächlich vorausgehen. Meist werden die früh nachlassende Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit („processing speed theory“, Salthouse, 1996) oder die frühe Beeinträchtigung exekutiver Funktionen (Chan, Shum, Touloupoulou & Chen, 2008), vor allem der Inhibitionsleistung (Hasher & Zacks, 1988) und des Arbeitsgedächtnisses, mit linearer Abnahme ab etwa dem 20. Lebensjahr (Brockmole & Logie, 2013), in diesem Zusammenhang diskutiert (Salthouse, Atkinson & Berish, 2003; Borella, Carretti & De Beni, 2008). Andere Autoren postulieren im Rahmen der Common-Cause-Hypothese (Lindenberger & Baltes, 1994) die interindividuelle Variabilität in

sensorischen und sensomotorischen Leistungen als ausschlaggebend für die kognitive Leistungsfähigkeit im Alter (Lövdén et al., 2004; Kotter-Grühn et al., 2010; Livingston et al., 2017).

### 3.1 Exekutive Funktionen

Exekutive Funktionen stellen kein einheitliches Konstrukt dar, sondern subsummieren kognitive Kontrollprozesse und behaviorale Regulationsmechanismen, die andere kognitive Operationen koordinieren und überwachen und somit eine planvolle und effektive Zielerreichung ermöglichen. Arbeitsgedächtnis, Handlungsinitiierung, Monitoring, Persistenz, mentale Flexibilität, Problemlösefähigkeit, Inhibitionskontrolle und Multitasking sind einige davon (Chan et al., 2008, Salthouse et al., 2003). Das Frontalhirn und insbesondere der PFC werden als ein wichtiges Substrat für exekutive Prozesse angesehen, weshalb oftmals exekutive Funktionen als Frontalhirnfunktionen bezeichnet werden (Barkley, 2012; Pennington, Bennetto, McAleer & Roberts, 1996). Damit stehen sie in engem Zusammenhang zur Frontalhirnhypothese des Alterns (West, 1996; Chan et al., 2008), in der altersassoziierte kognitive Defizite auf Abbauprozesse im Frontallappen zurückgeführt werden, eine Region, die spät ausreift und im Alterungsprozess besonders frühe Beeinträchtigungen zeigt. Diese Betrachtung ist etwas verallgemeinernd, denn nicht alle Frontalhirnpatienten weisen beeinträchtigte Exekutivfunktionen auf (Shallice & Burgess, 1991) und nicht alle Beeinträchtigungen in exekutiven Funktionen gehen mit Läsionen im Frontalhirn einher (Reitan & Wolfson, 1994; Miyake et al., 2000; Barkley, 2012). Die Befundlage spricht dafür, dass das Konstrukt exekutiver Funktionen nicht eindimensional, sondern aus mehreren Subkomponenten bestehend zu betrachten ist (Miyake et al., 2000). Die Interkorrelationen zwischen Aufgaben zu exekutiven Leistungen sind meist gering, oft nicht statistisch signifikant (Salthouse et al., 2003) und die Alterseffekte selektiv (Crawford, Bryan, Luszcz, Obonsawin & Stewart, 2000; Wecker, Kramer, Wisniewski, Delis & Kaplan, 2000). Über die Anzahl und die genaue Natur einzelner Subkomponenten gibt es keinen Konsens (Salthouse et al., 2003). Miyake et al. (2000) untersuchten drei der am häufigsten in der Literatur postulierten exekutiven Funktionen „*shifting* of mental sets“, „*monitoring and updating* of working memory representations“ sowie „*inhibition* of prepotent responses“ und fanden moderate Interkorrelationen sowie unterschiedlich starke Assoziationen zu komplexeren exekutiven Aufgaben wie dem Turm von Hanoi (Assoziation zu Inhibitionsleistungen),

Wisconsin Kartensortiertest (Shifting), die Generierung von Zufallszahlen (Inhibition & Updating) und Operation Span (Updating). In der aktuellen Untersuchung werden in Anlehnung an Miyake et al. (2000) sowie Salthouse et al. (2003) drei Subkomponenten exekutiver Funktionen (Arbeitsgedächtnis, kognitive Flexibilität und Inhibitionskontrolle) zur Schätzung der kognitiven Leistungsfähigkeit erfasst und im Folgenden kurz vorgestellt.

### *Arbeitsgedächtnis (Updating)*

Der Begriff Arbeitsgedächtnis (AG) wird häufig synonym zum Kurzzeitgedächtnis (KZG) verwendet. Während das KZG jedoch nur den temporären Zustand der Aktivierung von Informationselementen bezeichnet, bezieht sich das AG sowohl auf die temporäre Aufrechterhaltung von Information als auch auf die kontrollierte „Verarbeitung der gerade aktivierten Informationselemente durch geistige Operationen“ (Kluwe, 1992, S. 136) und betrifft im wörtlichen Sinne die „Arbeit mit dem Gedächtnis“. Es ist ein internes kognitives System, das mehrere arbeitsrelevante Informationen in einem hoch aktivierten Zustand vorübergehend speichert, sodass diese im Dienste kognitiver Prozesse und Verhaltensziele rasch zugänglich gemacht, bewertet, transformiert und anderweitig miteinander in Beziehung gesetzt werden können (Smith & Kosslyn, 2007; Hasselhorn & Grube, 2003). Den Gedanken unterscheidbarer Gedächtnissysteme hatte bereits William James (1890), der das Primärgedächtnis als Kurzzeitspeicher mit aktuell bewussten Inhalten vom Sekundärgedächtnis, dem potentiell unbegrenzten Langzeitspeicher unterschied. In den 1950er- und 1960er-Jahren konzentrierten sich experimentelle Bemühungen stark auf den Kurzzeitspeicher mit seiner begrenzten Kapazität und den Unterschied zum Langzeitgedächtnis. Mehrspeichermodelle wie das von Atkinson und Shiffrin (1968) gingen erstmals davon aus, dass die von der Umwelt aufgenommenen Informationen (visuell/auditiv/haptisch) zunächst einen sensorischen Speicher passieren (Hasselhorn & Grube, 2003) und anschließend über das KZG als einem notwendigen Durchgangsort, u. a. durch Wiederholung von Inhalten, Gruppierungs- und Kodierungsstrategien (z. B. Chunking) dem Langzeitgedächtnis zugeführt und später aus diesem wieder abgerufen werden können. Somit fassten bereits Atkinson und Shiffrin (1968) das KZG als eine Art AG auf, welches die aktuell aktivierte Informationsmenge durch kognitive Operationen verarbeiten konnte (Kluwe, 1992). Nachfolgende Untersuchungen ließen jedoch Zweifel an der Annahme der sequentiellen Speicherung aufkommen (Shallice & Warrington, 1970). Auch die Eindimensionalität des Kurzzeit-/Arbeitsgedächtnisses als einer „globalen Aufmerksamkeits-

Energie bzw. einer ‚generischen‘ mentalen Kapazität ..., die zur Erfüllung der unterschiedlichen Funktionen des Arbeitsgedächtnisses (z. B. Verarbeiten, Speichern, Koordinieren) aufgeteilt werden muss“, erwies sich in empirischen Arbeiten als nicht tragbar (Hasselhorn & Grube, 2003, S. 32). Mit dem Baddeley-Hitch-Modell (1974) entstand aus dem Konzept des KZG die moderne Idee des Arbeitsgedächtnisses mit der Betonung auf interagierende Kontrollprozesse (Smith & Kosslyn, 2007). Das Modell nimmt mehrere distinkte modalitätsspezifische und jeweils kapazitätsbegrenzte Speichersysteme an. Die phonologische Schleife besteht aus einem phonetischen Speicher, der verbale Information für einige wenige Sekunden speichern kann und einem subvokalen Wiederholungsprozess, der durch das innere Sprechen bzw. Wiederholen die Information aktiv hält. Auch werden hier bildliche Informationen in phonologische Inhalte umkodiert (Hasselhorn & Grube, 2003). Der räumlich-visuelle Notizblock dient zur Speicherung visueller und räumlicher Informationen und der mentalen Navigation durch diese. Den Speichersystemen ist eine modalitätsunspezifische Kontrolleinheit die sog. zentrale Exekutive übergeordnet, welche die Hilffsysteme überwacht, koordiniert und steuert, Informationen integriert, manipuliert und übersetzt (Smith & Kosslyn, 2007; Hasselhorn & Grube, 2003). Diese besitzt eine große Ähnlichkeit zum Kontroll- und Steuersystem SAS (supervisory attentional system) im ATA-Modell (attention-to-action) von Norman und Shallice (1986). Ein später hinzugefügtes drittes Speichersystem, der episodische Buffer, wird als ein multimodales System aufgefasst, welches als ein Hilfsspeicher bei Überladung/Beeinträchtigung primärer Speichersysteme fungieren kann, aber auch ein Integrationssystem für verschiedene Informationstypen und ein Kurzzeitspeicher für komplexe episodische Informationen darstellt (Smith & Kosslyn, 2007). Empirische Evidenz aus behavioralen, klinischen und bildgebenden Studien stützt die Annahme distinkter Speichersysteme für verbale (eher linke Hemisphäre) und visuell-räumliche (eher rechte Hemisphäre) Informationen (z. B. Smith & Jonides, 1999; Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005, S. 196). Des Weiteren scheint der dorsale PFC stärker bei der Manipulation der Information beteiligt zu sein, während der ventrale PFC auch bei alleiniger Informationsaufrechterhaltung aktiv ist. Auch der parietale und der temporale Kortex scheinen vor allem am kurzfristigen Aufrechterhalten der Information beteiligt zu sein (Braver et al., 1997). Der Alterungsprozess wirkt selektiv auf die AG-Komponenten. Dabei scheint die phonologische Schleife minimal beeinträchtigt zu sein, sodass sich beim unmittelbaren Abruf einer Zahlenreihe kaum relevante Altersunterschiede zeigen (z. B. Botwinick & Storandt, 1974; Craik, 1968). Deutlichere Alterseffekte sind hingegen bei einem verzögerten Abruf, insbesondere bei hohen im Vergleich zu geringen Gedächtnisbelastungen

(memory load) zu beobachten (Craik, 1977; Anders, Fozard & Lillyquist, 1972; Hillary & DeLuca, 2007).

The disproportionate effect of increasing memory load on older peoples' WM performance may reflect a distinction between slave system components for the short-term maintenance of information and an executive component for manipulation of information in the service of optimizing short-term memory performance (cf. Craik & Jennings, 1992). (Rypma, Prabhakaran, Desmond & Gabrieli, 2001, S. 372)

In der experimentellen Forschung wird zwischen Aufgaben unterschieden, die primär eine Speicherung bzw. Aufrechterhaltung der Information beinhalten (KZG z. B. Sternberg-Aufgabe, siehe Kap. 5.2.1) und solchen, die eine zusätzliche Verarbeitung dieser Information erfordern (AG z. B. N-back-Aufgabe, Kap. 5.2.1). Insbesondere komplexe Aufgaben zur Erfassung der AG-kapazität (Daneman & Carpenter, 1980; Turner & Engle, 1989, Kap. 5.2.1) beanspruchen aufgrund der Doppelaufgabenbearbeitung exekutive Prozesse des Aufgabenmanagements und Aufgabenwechsels sowie ein hohes Maß an exekutiver Aufmerksamkeit (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005). Behaviorale Daten mit hohen Korrelationen zwischen den komplexen Span-Aufgaben und zahlreichen kognitiven Funktionen (Turner & Engle, 1989) sowie hoher Sensitivität gegenüber Alterseffekten lassen hinter den einfachen und komplexen Span-Aufgaben qualitativ unterschiedliche Gedächtnisformen vermuten. Bildgebende Verfahren sprechen jedoch eher für ein Kontinuum zwischen den einfachen KZG- und den komplexen Span-Aufgaben, die sich nach dem Ausmaß der Inanspruchnahme exekutiver Prozesse anordnen lassen (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005). Die Aufgabenposition auf dem Kontinuum ist nicht zwangsläufig fest definiert, sondern variiert u. a. in Abhängigkeit von der Memory-Setgröße innerhalb der Aufgabe (Setgröße 7 erfordert mehr exekutive Prozesse als Setgröße 2), der subjektiven Aufgabenschwierigkeit (weniger fähige Personen benötigen mehr exekutive Ressourcen) und dem Lebensalter (ältere Probanden neigen zur stärkeren Zuhilfenahme exekutiver Prozesse).

### *Aufgabenwechsel und kognitive Flexibilität (Shifting)*

Eines der Symptome bei Frontalhirnpatienten ist die Perseveration und die beständige Wiederholung einer nicht mehr länger geforderten Reaktion, was auf ein Defizit in der Umstellung sog. mentaler Sets zurückgeführt wird (Stuss & Benson, 1986; Miyake et al.,

2000). Kognitive Flexibilität erfordert die exekutive Kontrolle der Aufgabensets: „Our ability to configure the processing resources available in the brain to perform one rather than another of the many cognitive tasks that an upcoming stimulus may afford“ (Monsell, Yeung & Azuma, 2000, S. 250). Die Rekonfiguration des Systems für die Anwendung einer neuen Aufgabenregel auf den nächsten Stimulus, ist mit Wechselkosten (Reaktionszeitverzögerung, Fehlerzunahme) verbunden, die in diversen Task-Switching-Paradigmen untersucht wurden (Monsell et al., 2000). Jersild (1927) ließ erstmals Probanden Rechenaufgaben mit unterschiedlichen Rechenregeln bearbeiten. Wechselte die Rechenregel innerhalb eines Aufgabenblocks (ABAB), erhöhte sich die Bearbeitungszeit im Vergleich zum Rechenblock ohne einen Regelwechsel (homogene vs. heterogene Blocks). Spector und Biedermann (1976) stellten weiterhin fest, dass der Abruf der Rechenregel aus dem Gedächtnis durch einen expliziten Hinweisreiz (cue) (z. B. „+“, „-“) erleichtert wird und die Reaktionszeit reduziert (Koch, 2003). Allport, Styles und Hsieh (1994) vermuteten die Wechselkosten in Carry-over-Effekten. Durch positives Priming der zuvor angewendeten Aufgabenregel entstünden Interferenzen mit der aktuell geforderten Aufgabe. Zugleich müsse die Inhibition der nun erneut reaktionsrelevant gewordenen Aufgabenregel überwunden werden (Monsell et al., 2000). Weiterhin wurde festgestellt, dass eine Verlängerung des Reaktions-Stimulus-Intervalls zwar die Wechselkosten senkt, diese jedoch nicht gänzlich eliminieren kann (residuale Wechselkosten, Rogers & Monsell, 1995; Allport et al., 1994). Monsell et al. (2000) unterscheiden beim Switching einen aktiven, endogenen Kontrollprozess im Vorbereitungsintervall von einem durch den Stimulus getriggerten exogenen Prozess des Abrufs des relevanten mentalen Sets bzw. des Rekonfigurationabschlusses, der für die residualen Kosten verantwortlich ist.

Insgesamt scheinen sowohl Primingeffekte wie Rekonfigurationsprozesse an den Wechselkosten beteiligt zu sein (Monsell et al., 2000). Es wird angenommen, dass die exekutive Kontrolle als endogene Rekonfiguration „vorwiegend während der Vorbereitung auf eine wechselnde Aufgabe zum Tragen kommt“ und die Rolle exekutiver Prozesse auch darin besteht, eine optimale Leistung durch die Initiierung von Aktivierungs- und Hemmungsprozessen sowie eine Abstimmung des Gleichgewicht zwischen diesen Prozessen zu gewährleisten (Gajewski, 2005, S. 16). Ältere Personen scheinen meist keine größeren lokalen Switchingkosten (siehe Kap. 5.2.3) im Vergleich zu jüngeren Probandengruppen aufzuweisen (dagegen siehe Mayr, 2001), während globale Wechselkosten erhöht sind (z. B. Kray & Lindenberger, 2000). Kramer, Hahn und Gopher (1999) konnten für ältere Probanden erhöhte lokale Switchingkosten nachweisen, die sich jedoch im Laufe des Trainings denen

jüngerer Erwachsener anglichen. Neuropsychologische und -physiologische Evidenz spricht dafür, dass ein Wechsel zwischen Aufgaben oder mentalen Sets unter primärer, wenngleich nicht ausschließlicher Beteiligung des Frontalhirns erfolgt (Braver, Reynolds & Donaldson, 2003; Dreher, Koehlin, Ali & Grafman, 2002). Auch bioccipitale und parietale Regionen scheinen, einer EKP-Studie zufolge beteiligt zu sein (Miyake et al., 2000; Moulden et al., 1998).

### *Inhibitionskontrolle (Inhibition)*

Das psychologische Konzept der Inhibition hat seine Wurzeln in der klinischen und experimentellen Physiologie als funktionaler Gegenspieler der neuralen Aktivierung. Gemeint ist jedoch kein passiver Vorgang, sondern eine aktive Suppression einer Aktion, wie z. B. eines sensorischen Inputs, motorischen Outputs oder eines internalen Prozesses (Burle, Vidal, Tandonnet & Hasbroucq, 2004; Jonides, Smith, Marshuetz, Koeppe & Reuter-Lorenz, 1998). Lustig, Hasher & Zacks (2007) fassten drei Funktionen inhibitorischer Prozesse zusammen: die Kontrolle des Zugangs zum Aufmerksamkeitsfokus, die Beseitigung irrelevanter Information aus dem AG sowie die Suppression dominanter, jedoch nicht zielführender Reaktionen. Barkley (1997) formuliert mit der Interferenzkontrolle, der Unterdrückung anlaufender Reaktionen sowie der Inhibition präpotenter oder dominanter Reaktionen sehr ähnliche Aspekte der Inhibitionsprozesse (Berlin, 2003). Inhibitionsprozesse werden als Quelle für altersassoziierte AG-Defizite angesehen (Borella et al., 2008) und gelten als besonders vulnerabel für Alterungseffekte (Matthews, Davies, Westerman & Stammers, 2000; Fabiani, 2012; Lustig et al., 2007). Die oft zitierte Inhibitionsdefizithypothese von Hasher & Zacks (1988) geht von einer abnehmenden Effizienz inhibitorischer Prozesse mit zunehmendem Alter aus, welche die Anfälligkeit gegenüber Interferenz durch irrelevante Stimuli erhöht. Die Zugangskontrolle zum AG durch Inhibition zielirrelevanter Prozesse bildet den zentralen Fokus der Theorie. Aufgrund defizienter Inhibitionsmechanismen bei der Enkodierung gelangen aufgabenirrelevante Informationen leichter ins AG, reduzieren die funktionale AG-Kapazität durch zusätzliche Verarbeitungsressourcen und lenken von aufgabenrelevanten Prozessen ab (Matthews et al., 2000, S. 307; Hasher, Stoltzfus, Zacks, & Rypma, 1991). Die Inhibitionsmechanismen wirken sowohl während der Enkodierungsphase als auch während des Gedächtnisabrufs, indem Aktivierungen irrelevanter Suchbahnen eingedämmt und der Wettbewerb zwischen aktivierten Inhalten minimiert wird. Die Inhibitionshypothese konnte insbesondere in Experimenten zum negativen Priming

Unterstützung finden, andere Untersuchungen zeigten etwas eingeschränkte Ergebnisse (Matthews et al., 2000).

Sensorische und motorische Inhibitionsaufgaben scheinen durchweg ein Altersdefizit aufzuweisen (McDowd et al., 1995; Nielson et al., 2002). Insgesamt berichten Untersuchungen in verschiedenen kognitiven Domänen bei älteren Studienteilnehmern über mehr Intrusionen aufgabenirrelevanter Informationen durch Umweltfaktoren und interne Gedanken (z. B. McDowd, Oseas-Kreger & Fillion, 1995; Layton, 1975), eine erhöhte Interferenz beim Erlernen einer neuen Aufgabe, wenn diese mit zuvor gelernter Reaktion konkurriert (Kausler & Hakami, 1982), sowie eine höhere Persistenz irrelevanter Informationen im AG und ein erleichterter Abruf dieser (Hamm & Hasher, 1992; Hartman & Hasher, 1991; Nielson, Langenecker & Garavan, 2002). Die Effizienz mit der Inhibitionsprozesse ausgeführt werden, spiegelt einen Aspekt exekutiver Funktionen wider, da gewohnte, automatische, vertraute oder bereits initiierte Prozesse willentlich unterbunden werden müssen (Salthouse et al., 2003; Miyake et al., 2000). Auch wenn die funktionelle Neuroanatomie der Inhibitionsprozesse nicht gänzlich geklärt ist, zeigen bildgebende Untersuchungen zur Reaktionsinhibition meist konsistent Aktivierungen in ventralen und dorsalen Regionen des PFC (Nielson et al., 2002; Jonides et al., 1998). Zudem gehen Beeinträchtigungen des lateralen Präfrontalhirns entsprechend der Distractibility-Hypothese (Unfähigkeit zur Unterdrückung irrelevanter Stimuli in vielen sensorischen, motorischen und kognitiven Prozessen bei PFC-Schädigung; Malmö, 1942; Bartus & Levere, 1977) in Mensch- und Tiermodellen mit Inhibitionsdefiziten einher (Chao & Knight, 1995; Knight, Staines, Swick & Chao, 1999), ebenso wie in den mit dem Frontalhirn assoziierten klinischen Syndromen wie z. B. der Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung, der Zwangsstörung oder dem Tourette-Syndrom (Nielson et al., 2002). Die oft zur Untersuchung der Inhibitionskontrolle verwendeten Stroop- und Antisakkaden-Aufgaben sowie die Hayling-Aufgabe zeigen sich als sensitiv gegenüber Frontalhirnläsionen und -dysfunktionen (Miyake et al., 2000; Burgess & Shallice, 1996). Ebenso wird die Leistung in den Go-/No-go- und Stop-Aufgaben in einer Verbindung mit dem dorsolateralen PFC gesehen (Lustig et al., 2007).

### **3.2 Funktionale Bildgebung und kognitives Altern**

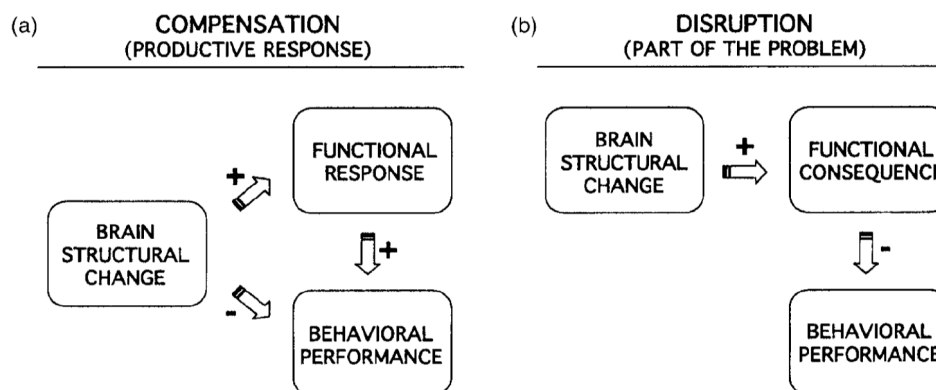
Zahlreiche Querschnittsstudien berichten eine mit dem Alter linear zunehmende Reduktion der grauen Substanz bis in die späten Sechzigerjahre mit einer Abflachung ab etwa dem 70.



Lebensjahr, während die weiße Substanz eine umgekehrt U-förmige Funktion mit einer rapiden Zunahme zwischen der Adoleszenz bis in die frühen Zwanzigerjahre aufweist, gefolgt von einem Plateau bis etwa zum 60. Lebensjahr und einer Abnahme im späteren Lebensalter (Sowell et al., 2003; Giedd et al., 1999; Raz, 2005). Altersassoziierte Volumenänderungen der einzelnen Hirnregionen weisen differentielle Verläufe auf (Raz, 2000, 2005). Trotz einer hohen Variabilität der Studienergebnisse, die zum Teil auf unterschiedliche Definitionen untersuchter Regionen und des methodischen Vorgehens zurückzuführen sind (Raz, 2005), besteht Einigkeit darüber, dass Assoziationskortizes vulnerabler für das Altern sind als primäre sensorische Regionen. Längsschnittstudien berichten eine nichtlineare Erweiterung des ventrikulären Systems um im Schnitt etwa 0.43 % pro Jahr für 24- bis 37-Jährige und um bis zu 5 % pro Jahr für 70- bis 81-Jährige (Raz, 2005). Auch für das Gehirnvolumen lässt sich über mehrere Studien hinweg eine Abnahme mit einem Medianwert von 0.18 % pro Jahr abzeichnen (für 24- bis 46-Jährige etwa 0.12 % pro Jahr und für 52- bis 79-Jährige 0.35 % pro Jahr, Raz, 2005). Ein besonders robuster Befund ist die altersassoziierte Volumenreduktion in frontalen und hippocampalen Strukturen, die als zentral für höher-geordnete Kognitionen angesehen werden („frontal aging hypothesis“, Buckner, 2004; Vance et al., 2012; West, 1996; Cabeza, Nyberg & Park, 2005; Raz, 2005). Resnick, Pham, Kraut, Zonderman & Davatzikos (2003) untersuchten in einer MRT-Studie 92 ältere Probanden im vierjährigen Rhythmus. Die Abnahme der weißen und grauen Substanz unterschied sich je nach Gehirnregion, mit der geringsten Abnahme in occipitalen Regionen und der höchsten Schrumpfrate im Frontalhirn, gefolgt von parietalen Regionen. Insgesamt ist die Abnahme des Hirnvolumens geringer, wenn nur gesunde Probanden berücksichtigt werden. Raz et al. (2005) untersuchten 20- bis 77-Jährige über 5 Jahre und berichteten ebenfalls von der stärksten Schrumpfrate im PFC (0.91 % pro Jahr) und fehlender Abnahme im occipitalen Kortex. Scahill et al., (2003) untersuchten den temporalen Lappen von 39 gesunden Erwachsenen über etwa 1.7 Jahre. Die insgesamt milde Abnahme verstärkte sich leicht mit dem Alter. Interessanterweise erhöhte sich die interindividuelle Variabilität der Änderungsrate drastisch mit zunehmenden Lebensjahren. Interessant ist auch der Befund, dass für mehrere Hirnregionen eine altersabhängige Volumenreduktion nicht mit einer beschleunigten Abnahmerate im höheren Alter einherging, z. B. im Striatum (Raz, 2005). PET und SPECT(Single-Photon-Emissions-Tomographie)-Studien liefern zudem Evidenz für altersabhängige Verluste der post- und präsynaptischen Dopaminmarker, die entweder einen Verlust an Neuronen, Synapsen pro Neuron und/oder eine Expression des Rezeptorproteins pro Neuron widerspiegeln könnten. Für die D1- und D2-Rezeptorbindung wird ab dem jungen

Erwachsenenalter eine Abnahme zwischen 4 % und 10 % pro Dekade verzeichnet, die mit der Abnahme kognitiver Leistungen assoziiert ist. Altersassoziierte striatale Dopamindefizite werden auch mit Dysfunktionen des PFC in Verbindung gebracht. Auch lassen sich altersabhängige Dopamin-Bindungsdefizite im PFC, in posterioren kortikalen und hippocampalen Regionen beobachten (Cabeza et al., 2005). Zerebrovaskuläre Erkrankungen, Schlaganfälle und Diabetes wirken sich negativ auf zerebrale Strukturen und Funktionen älterer Personen aus (Pantoni, Inzitari & Wallin, 2001). Auch medikamentös behandelter Blutdruck ist assoziiert mit Abnormalitäten in der weißen Substanz sowie mit einer Abnahme der grauen und weißen Substanz im PFC (Raz, Rodrigue & Acker, 2003). Der Ausschluss von Blutdruckpatienten reduziert signifikant Alterseffekte auf das Gehirn und die Kognition (Goldstein, Bartzokis, Guthrie & Shapiro, 2002). Im Gegenzug dazu beeinflusst sportliche Fitness viele Variablen, die mit neuronaler Gesundheit assoziiert sind. Exekutive Funktionen sind besonders sensitiv für fördernde Effekte sportlicher Aktivität (Colcombe & Kramer, 2003; Raz, 2005). Der kognitive Alterungsprozess ergibt sich demzufolge aus einer Summe multipler, koexistierender und miteinander interagierender struktureller und funktioneller Ursachefaktoren mit unterschiedlichen Ausprägungen, Mustern, Verläufen, individuellen Reaktionen und aktiven Adaptations- und Kompensationsmechanismen (Buckner, 2005). Funktionelle Altersunterschiede fallen meist in drei Aktivierungskategorien: 1. Es bestehen keine Aktivierungsunterschiede zwischen Altersgruppen, 2. ältere Probanden zeigen eine Unteraktivierung bestimmter Regionen (z. B. der anteriore Hippocampus und medial-temporale Regionen, Mitchell, Johnson, Raye & D'Esposito, 2000; Grady, Bernstein, Beig & Siegenthaler, 2002) im Vergleich zu jüngeren Probanden und 3. ältere Probanden zeigen eine höhere Aktivierung bestimmter Regionen (z. B. Frontalkortex, Cabeza, Anderson, Locantore & McIntosh, 2002) als jüngere Personen (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005). Oftmals zeigen ältere Probanden zur Bewältigung gleicher Aufgabenanforderungen trotz vergleichbarer Verhaltensdaten die Tendenz zur Aktivierung anderer Hirnregionen als jüngere Probanden. Es wird von einer Reorganisation des neuralen Systems ausgegangen (Cabeza et al., 1997), da Reaktionszeiten bei Jüngeren und Älteren teils von unterschiedlichen Gehirnregionen beeinflusst werden (Madden et al., 1999) und die Aktivierung der gleichen Region für jüngere und ältere Probanden mitunter gegenteilige Zusammenhänge zur Leistung aufzeigt (Rypma & D'Esposito, 2000; Grady, 1998, 2002). Es ist nicht immer klar, ob der vermuteten neuralen Reorganisation nicht eher ein Unterschied in Strategien zugrunde liegt. Weiterhin zeigen Studien zu Gedächtnisfunktionen bei älteren Probanden u. a. eine mit dem Alter abnehmende hippocampale und medial-temporale Aktivierung, Unterschiede in links frontaler Aktivierung

sowie eine bilaterale Aktivierung des frontalen Kortex im Vergleich zu unilateraler Aktivierung bei Jüngeren (Park & Gutchess, 2005). Auch gibt es Altersunterschiede in der Aktivierung während unterschiedlicher Verarbeitungsstufen, z. B. Enkodierung vs. Gedächtnisabruf (z. B. Grady et al., 2002). Es werden mehrere Mechanismen zum Zusammenspiel zwischen neuronalen Veränderungen und kognitiven Leistungen diskutiert. Ein besonders häufiger Befund ist die in zahlreichen Untersuchungen in mehreren kognitiven Domänen beobachtete höhere und symmetrischere Rekrutierung (prä)frontaler Regionen durch ältere Probanden (Grady, 1998, 2002; Madden et al., 1997; Cabeza et al., 2002; Rosen, Prull et al., 2002), die sich auch bei Personen mit AD, bei Risikopatienten für AD und Schlaganfallpatienten beobachten lässt (nach Buckner, 2004). Da u. a. histologische Studien den PFC als besonders vulnerabel für Alterungseffekte betrachten, einhergehend mit einer Abnahme in der Neuronenanzahl (z. B. Brizzee, Ordly & Bartus, 1980), einer Anfälligkeit für Amyloid-Plaques (z. B. Heilbroner & Kemper, 1990) sowie Verlusten an Synapsen (Huttenlocher, 1979; Haug & Eggers, 1991) und dendritischen Verzweigungen (Rypma et al., 2001), besteht Uneinigkeit darüber, inwieweit die zusätzliche präfrontale Aktivierung einen Kompensationsmechanismus, als positive, leistungsaufrechterhaltende Antwort auf neuronale Veränderungen, darstellt (Cabeza, 2002) oder selbst ein Zeichen der Dysfunktion, u. a. im Sinne einer nicht selektiven, arbiträren Aktivierung durch zunehmende Unfähigkeit zur selektiven Rekrutierung darstellt (Logan, Sanders, Snyder, Morris & Buckner, 2002, Abb. 3).



**Abbildung 3 a, b.** Schematische Darstellung zwei alternierender Sichtweisen auf die altersassoziierte Zunahme frontaler Aktivierung

a = Aktivierungszunahme erhöht die Leistung als kompensatorische funktionelle Antwort auf vorausgegangene strukturelle Hirnschädigung; b = Aktivierungszunahme ist Ausdruck und Folge vorausgegangener Hirnschädigung (nach Buckner, 2005, S.275)

Insgesamt spricht die Mehrheit der Ergebnisse eher dafür, dass die Rekrutierung zusätzlicher Hirnregionen wie des dorsolateralen PFC für zumindest einige Aufgabenarten kompensatorisch ist (Grady, 2005). Es gibt die Vermutung, dass die präfrontale Aktivierung bei älteren Personen eine stärkere Nutzung exekutiver Funktionen bereits bei geringerer Aufgabenschwierigkeit reflektiert und in generalisierter Weise bei Aufgaben, für die jüngere Probanden keine zusätzliche Aktivierung benötigen (Grady, 2002, 2005).

### **3.3 Ereigniskorrelierte Potentiale des Elektroenzephalogramms**

Das in der aktuellen Untersuchung eingesetzte Elektroenzephalogramm (EEG, Berger, 1929) ist die mittels Elektroden von unverletzter Kopfhaut abgeleitete elektrische Aktivität des Gehirns, die durch die synchrone Aktivität einer größeren Neuronenzahl mit gleicher Ausrichtung des elektrischen Feldes erzeugt wird. Es wird davon ausgegangen, dass das EEG die synchrone Aktivität post-synaptischer Summenpotentiale von in Schichten angeordneter Strukturen mit offenen Feldern abbildet und somit vor allem die kortikale Aktivität erfasst (Fabiani, Gratton & Federmeier, 2007). Das EEG gilt aufgrund seiner hervorragenden zeitlichen Auflösung als eine wichtige non-invasive Methode der direkten Messung neuraler Aktivität. Die im Vergleich zum Spontan-EEG ( $> 50 \mu\text{V}$ ) nur wenige  $\mu\text{V}$  hohen EKP treten in Reaktion auf diskrete sensorische, kognitive und zentral-motorische Prozesse auf und werden zur Verbesserung des Signal(EKP)-Rausch(EEG)-Verhältnisses durch die Mittelung zahlreicher Epochen gleicher Ereignisse aus dem Spontan-EEG extrahiert. Die EKP können den gesamten Ablauf zwischen der Vorbereitung auf einen Reiz, dessen Wahrnehmung, Reaktion und Bewertung dieser abbilden und werden in frühe exogene, d. h. durch sensorisch-physikalische Reizeigenschaften ausgelöste (50–200 ms) und endogene (200–800 ms), durch kognitive und intrapsychische Prozesse ausgelöste EKP, unterteilt (Boden, Gajewski, Willemsen, Getzmann & Falkenstein, 2017). Definiert werden die EKP meist durch ihre Polarität (Positivierung vs. Negativierung), die ungefähre Latenz der maximalen Auslenkung (Peak in ms) und die topographische Verteilung auf der Schädeloberfläche (z. B. N200, Negativierung mit einem Peak nach etwa 200 ms post-stimulus mit einer occipitalen, zentralen oder frontalen Verteilung), teilweise aber auch durch die ihnen zugrunde liegende Funktion (z. B. Ne, Error Negativity; MMN, Mismatch Negativity). Mithilfe der EKP können Prozesse sichtbar gemacht werden, die einer offenen Verhaltensmessung nicht zugänglich sind (z. B. das Unterdrücken einer Reaktion) und Gruppenunterschiede in

neuronaler Informationsverarbeitung untersucht werden, die sich nicht in Reaktionszeiten und Fehlerraten widerspiegeln (Moreno, Wodniecka, Tays, Alain & Bialystok, 2014; Smart, Segalowitz, Mulligan & MacDonald, 2014).

Altersvergleichende Untersuchungen berichten eine Verlangsamung des Grundrhythmus des EEG, insbesondere des Alpha-Rhythmus, Veränderung der Kohärenz- und räumlicher Muster sowie eine Verlangsamung einiger Latenzen und Amplitudenänderungen mehrerer EKP (Fabiani & Gratton, 2005). So wurde u. a. für ältere im Vergleich zu jüngeren Personen eine höhere P50- bzw. P1-Amplitude bei vergleichbarer Latenz berichtet und im Zusammenhang mit mangelnder Inhibitionskontrolle diskutiert. Eine reduzierte Suppression der P50 könnte Inhibitionsdefizite, Defizite im sensorischen Gating oder eine sensorische Überladung widerspiegeln (Friedman, 2008). Ebenso die auditive N1, die als ein Index des frühen sensorischen Aufmerksamkeitsgatings verstanden wird, ist für ältere Personen in Reaktion auf irrelevante Stimuli und insgesamt auf unbeachtete im Vergleich zu beachteten Standardreizen höher als für jüngere Probanden und wird ebenfalls im Zusammenhang mit einem beeinträchtigten Gatingprozess für irrelevante Informationen gesehen (u. a. Chao & Knight, 1997). Die visuelle N1 zeigt eine höhere Variabilität im Alter mit einer bimodalen Verteilung bei teils vergleichbaren Amplituden zu der jüngeren Probandengruppe und teils sehr hohen Amplitudenwerten (De Sanctis et al., 2007). Insgesamt wird meist eine höhere N1-Amplitude für Ältere berichtet (u. a. Snyder & Alain, 2005), aber es gibt Befunde mit gleich hohen (u. a. Gaeta, Friedman & Ritter, 2003) oder sogar höheren Amplituden für jüngere Probanden (u. a. Bertoli & Probst, 2005) bei vergleichbaren Latenzen (Friedman, 2008). Im Vergleich zur P50 und N1 sind altersassoziierte Veränderungen der P2 Komponente weniger gut erforscht und weniger eindeutig (Friedman, 2008). Weiterhin lässt sich eine altersassoziierte Amplitudenreduktion der MMN (Näätänen, Gaillard & Mäntysalo, 1978) dem „automatic deviation detection system“ (Friedman, 2008) beobachten, insbesondere bei einem längeren Inter-Stimulus-Intervall oder unter Bedingungen geteilter Aufmerksamkeit. Die Amplitudenminderung der MMN wird mit beeinträchtigten sensorischen Gedächtnisprozessen, einer abnehmenden Sensitivität gegenüber Regularitäten in der Umgebung bzw. einem weniger sensitiven „preattentive deviance detection system“ in Zusammenhang gebracht (Fabiani & Gratton, 2005; Friedman, 2008). Die N2b wird als erste Komponente der EKP mit bewussten sensorischen Diskriminationsprozessen gesehen und zeigt für ältere Probanden eine Latenzverzögerung. Latenzverzögerungen finden sich auch bei weiteren Komponenten, wie bspw. der N400, die bei der Detektion semantischer Verletzungen auftritt. Nicht immer werden eine Amplitudenreduktion und eine

Latenzverzögerung mit nachlassenden Fähigkeiten assoziiert. Neben der Möglichkeit mangelnder Inhibitionskontrolle bei älteren Probanden könnte auch ein größeres semantisches Netzwerk mehr Inhalte aktivieren und mehr Zeit für eine optimale semantische Einordnung erfordern. Mitunter am besten erforscht ist die in der aktuellen Arbeit relevante P3- bzw. P300-Komponente der EKP (Sutton, Braren, Zubin & John, 1965), die nach Polich (1996) aufgrund der Assoziation zu Aufmerksamkeits-, Gedächtnis- und exekutiven Prozessen für die Untersuchung von Alterungsprozessen besonders geeignet ist (Van Dinteren, Arns, Jongsma & Kessels, 2014; Rossini, Rossi, Babiloni & Polich, 2007; O'Connell et al., 2012). Die P3 wurde neben der typischen Reizdiskriminationsanforderung im Oddball-Paradigma (Ritter & Vaughan, 1969) in zahlreichen weiteren Paradigmen u. a. zum Arbeitsgedächtnis, episodischem Gedächtnis, Aufgabenwechsel, der selektiven Aufmerksamkeit und in Primingexperimenten untersucht (Friedman, 2008). Unter der Bedingung wiederholter devianter Non-Targets, welche zwar irrelevant sind, jedoch unbewusst eine Aufmerksamkeitszuwendung provozieren, ist der P3 (P3b) zeitlich eine als P3a bezeichnete Positivierung mit einer stärker anterioren Topographie vorgelagert (O'Connell et al., 2012). Die P3a reflektiert einen bottom-up gesteuerten Aspekt der Orientierungsreaktion und ist bei älteren Probanden sowohl in der auditiven, als auch visuellen und somatosensorischen Modalität geringer ausgeprägt und in ihrer Latenz verzögert (Friedman, 2008; Weisz & Czigler, 2006; Fjell & Walhovd, 2004). Wie andere Marker der Orientierungsreaktion habituiert bei wiederholter Darbietung unerwarteter, neuartiger Reize auch die P3a und nimmt in ihrer Amplitude ab (Czigler, Pató, Poszet & Balázs, 2006; Friedman, 2008). Bei älteren Probanden ist im Gegensatz zu jüngeren, unabhängig davon, ob die Reize beachtet oder ignoriert werden sollen, keine derartige Habituation zu beobachten (Czigler et al., 2006; Weisz & Czigler, 2006; Friedman, 2008). Es wird weiterhin auf präfrontale Mechanismen zugegriffen und wiederholt eine Orientierungsreaktion ausgelöst (Friedman, 2008; West, Schwarb & Johnson, 2010). Zudem zeigt sich für die P3a eine frontālere Topographie bei älteren Probanden (O'Connell et al., 2012; Friedman, 2008). Da die P3a mit der Aktivität im PFC assoziiert ist (Daffner et al., 2000; Knight, 1984), könnte dieser Befund als Unterstützung der Frontalhirn-Defizit-Hypothese des kognitiven Alterns interpretiert werden (Friedman, 2008). Im Gegensatz dazu hat die unmittelbar nachfolgende P3 (P3b, Sutton et al., 1965) auf bewusst fokussierte, aufgabenrelevante Stimuli ein meist parietales, etwa 300-600 ms post-stimulus auftretendes Maximum und entspringt multiplen neuronalen Quellen, u. a. temporal-parietalen Regionen und hippocampalen Bereichen des medial-temporalen Lappens (Polich, 1996). Die P3 wird meist im Kontext der Aufrechterhaltung von

Informationen im AG untersucht und mit der Allokation der Aufmerksamkeitsressourcen beim Updating des mentalen Modells der Stimulusumgebung im AG in Zusammenhang gebracht („context updating theory“, Donchin & Coles, 1988). „The P300 can be considered as a manifestation of central nervous system activity involved with the processing of new information when attention is engaged to update memory representations“ (Polich, 1996, S. 336, für weitere Erklärungsansätze siehe Van Dinteren et al., 2014). Über verschiedene Paradigmen hinweg konnte eine altersbedingte Abnahme der P3-Amplitude beobachtet werden (Friedman, 2008; Van Dinteren et al., 2014). Es wird davon ausgegangen, dass die P3-Amplitude die Menge an kognitiven Ressourcen widerspiegelt, die in die Aufgabenbearbeitung investiert werden. Somit könnte die Amplitudenhöhe einerseits die Gesamtressourcenkapazität reflektieren und andererseits die Menge an Ressourcen, die der aktuell zu bearbeitenden Aufgabe zugeteilt werden. Oft wiederholte, vertraute Stimuli sowie perzeptiv gut erkennbare Reize gehen mit kleineren P3-Amplituden einher, da geringere mentale Anstrengung gefordert ist. Schlechtere kognitive Leistung ist über verschiedene Tests hinweg meist mit kleineren P3-Amplituden assoziiert und könnte ein Hinweis auf reduzierte Verarbeitungsressourcen oder veränderte Arbeitsgedächtnisprozesse sein (Van Dinteren et al., 2014). Bei guter Gedächtnisleistung werden meist höhere P3-Amplituden beobachtet (Polich, 1996). Daffner et al. (2011) konnte jedoch in einem N-back-Paradigma zeigen, dass unter geringen Schwierigkeitsanforderungen hoch leistungsfähige Personen im Vergleich zu weniger leistungsfähigen Probanden kleinere P3-Amplituden produzieren und somit für gleich gute Leistung weniger Ressourcen benötigen. Zugleich waren sowohl junge wie ältere hoch leistungsfähige Probanden in der Lage bei steigender Aufgabenschwierigkeit zusätzliche Ressourcen zu rekrutieren und hohe P3-Amplituden zu entwickeln, was bei Probanden mit geringerer Leistungsfähigkeit nicht möglich war.

Die P3-Latenz wird als die Geschwindigkeit der Ressourcenallokation zur Stimulusklassifikation angesehen und oft als ein Maß für die allgemeine mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit und die Effizienz der neuronalen Informationsverarbeitung herangezogen (Polich, 2007). Die P3-Latenz ist im Vergleich zur Amplitude jedoch relativ unempfindlich für Unterschiede in den Parametern des Aufgabenparadigmas und erreicht ihre durchschnittlich minimale Latenz zeitlich später im Entwicklungsverlauf als die P3-Amplitude mit der maximalen Auslenkung um das 20. Lebensjahr herum (Van Dinteren et al., 2014). Van Dinteren et al. (2014) gehen davon aus, dass „a more efficient brain may not have the need to substantially recruit its cognitive capacity, if a task can be successfully performed with only a part of the available resources“ (S. 9). Wird im Entwicklungsverlauf

ein bestimmter Grad an Effizienz erreicht, könnten folglich weniger Ressourcen für die Aufgabenbearbeitung erforderlich sein. Die maximale Leistungsfähigkeit wird Van Dinteren et al., (2014) zufolge etwa um das 30. Lebensjahr herum erreicht, einem Zeitpunkt mit optimaler P3-Latenz und -Amplitude. Im späteren Alter sinkt die Verarbeitungsgeschwindigkeit und es lassen sich stabile altersassoziierte P3-Latenzverzögerungen nachweisen (Polich, 1996, 2007; Van Dinteren et al., 2014). Weiterhin weist die P3-Latenz eine negative Korrelation zur kognitiven Leistung auf (Polich, 2007) und ist bei dementiell Erkrankten verzögert (Polich, 1996, 2007; Parra, Ascencio, Urquina, Manes & Ibáñez, 2012).

Ein weiterer vielfach replizierter Befund ist eine Veränderung der Skulptopographie, der sog. Anterior-Shift der P3 (West et al., 2010; O'Connell et al., 2012). Für jüngere Probanden zeigt sich eine lineare Amplitudenabnahme von parietalen über zentrale hin zu frontalen Elektroden. Ältere hingegen zeigen oftmals sowohl parietale wie frontale Maxima (West et al., 2010; Kray, Eppinger & Mecklinger, 2005). Der Anterior-Shift der P3 lässt sich über verschiedene Modalitäten und Aufgabenparadigmen hinweg nachweisen und wird oftmals durch den Verlust der funktionalen Integrität des PFC erklärt.

Inwieweit der Anterior-Shift der Ausdruck eines Defizits verbunden mit einem Verlust an Verarbeitungseffizienz und folglich einer Leistungsminderung oder ein Kompensationsversuch zur Leistungsverbesserung und -aufrechterhaltung darstellt, bleibt weiterhin offen. So teilten Fabiani, Friedman und Cheng (1998) ältere Probanden entsprechend ihres P3b-Maximums auf (dominante Fz- vs. dominante Pz-Elektrode) und stellten eine deutlich schlechtere Leistung im Wisconsin-Card-Sorting-Test für die frontal dominante Gruppe fest. Sie folgerten daraus, dass der Anterior-Shift der P3 mit schlechteren exekutiven Leistungen einhergeht. West et al. (2010) gehen davon aus, dass reduzierte exekutive Inhibitionsfunktionen bei Älteren eine P3a sowohl auf neuartige als auch auf Targetstimuli auslösen (ähnlicher Befund bei Richardson, Bucks & Hogan, 2011). Ältere könnten größere Schwierigkeiten haben, eine robuste mentale Repräsentation der Stimuli auszubilden (O'Connell et al., 2012), weshalb sie immer wieder Neuheitsreaktionen über frontalen Elektroden auch für Targetstimuli zeigen. Durch die mangelnde Habituation auf Targetreize könnte es somit durch die Überlagerung der beiden Komponenten zu einer frontaleren Topographie der P3b kommen. Im Gegensatz dazu fanden jedoch u. a. Daffner et al. (2005) im Oddball-Paradigma für 33 % der Älteren mit den besten neuropsychologischen Testwerten eine im Vergleich zu Jüngeren breitere Frontalisierung der P3 sowohl auf



Standard- wie auf Target-Reize (Cabeza, 2002; Davis, Dennis, Daselaar, Fleck & Cabeza, 2007).

O'Connell et al. (2012) gehen davon aus, dass das kontinuierliche Zurückgreifen auf frontale Regionen bei Älteren einen Bedarf an der Aufrechterhaltung einer exekutiven Top-down-Kontrolle über die Aufgabenbearbeitung widerspiegelt. Aufgrund der Degeneration primärer aufgabenrelevanter Netzwerke wird nicht nur auf parietale, sensorisch basierte Prozesse zurückgegriffen, sondern es ist eine zusätzliche frontale Aktivierung nötig, um eine zu den jüngeren Probanden vergleichbare Leistung zu halten (Fjell & Walhovd, 2004).

Ähnlich wie in bildgebenden Untersuchungen bleibt unklar, unter welchen Bedingungen ein Anterior-Shift mit besserer bzw. schlechterer Leistung assoziiert ist (Reuter, Voelcker-Rehage, Vieluf, Lesemann & Godde, 2016).

## 4 Fragestellungen und Hypothesen

Die Behandlung kognitiver Beeinträchtigungen (u. a. MCI, AD) ist medikamentös nach wie vor schwer zugänglich, sodass die Erforschung weiterer aktiv veränderbarer Faktoren zum Erhalt und zur Förderung kognitiver Funktionen einen wichtigen Stellenwert besitzt. In früheren Untersuchungen erwies sich die CR als eine lebenslang beeinflussbare und sowohl direkt protektiv wie kompensatorisch wirksame Ressource angesichts kognitiver Defizite infolge neuronaler Schädigungen. Stern, Scarmeas & Habeck (2004) sehen den protektiven Einfluss der CR nicht zwangsläufig auf pathologische und traumatische Verläufe beschränkt: „Increased CR might also reduce the risk of the cognitive changes that occur in normal ageing“ (S. 20). Da ein aktiver Lebensstil im Sinne der CR einem kognitiven Training überlegen sein kann (Küster et al., 2016) und zugleich mit geringem personellen und finanziellen Aufwand in den (Berufs-)Alltag integrierbar wäre, ist es wichtig, die Rolle der CR für den gesunden Alterungsprozess umfassend zu untersuchen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Beziehung zwischen CR, der kognitiven Leistungsfähigkeit und Indikatoren bioelektrischer Hirnaktivität an gesunden Probanden im Erwerbsalter zu erforschen.

Folgende Hypothesen werden untersucht:

### *Reaktionszeiten und Fehlerraten*

**(1a)** *In Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis (AG), der kognitiven Flexibilität (KF) und der Inhibitionskontrolle (IH) sind für Probanden mit einer hohen kognitiven Reserve kürzere Reaktionszeiten und geringere Fehlerraten zu erwarten.*

Exekutive Funktionen, die oft als Frontalhirnfunktionen bezeichnet werden, unterliegen nicht nur besonders früh dem Alterungsprozess, sondern werden von einigen Autoren in engem Bezug zu der Wirkweise der CR gesehen (Siedlecki et al., 2009).

Es ist nicht auszuschließen, dass der Einfluss der CR aufgaben- und funktionsspezifisch ist, weshalb insgesamt drei Domänen exekutiver Leistungen untersucht werden. Zur Erfassung der AG-Leistung wurden verschiedene Aufgaben betrachtet, die sich im Grad der Inanspruchnahme exekutiver Prozesse unterscheiden. Während bei der Sternberg-Aufgabe (Kap. 5.2.1) insbesondere das kurzzeitige Aufrechterhalten der Information im KZG erfasst wird, erfordert die 2-back-Aufgabe zusätzliche weitere exekutive Verarbeitung der

aufrechtzuerhaltenden Information „including updating, task management, and selection“ (Cappell, Gmeindl & Reuter-Lorenz, 2010, S. 463) und die AOSPAN-Aufgabe eine hochkomplexe Leistung der exekutiven Aufmerksamkeit. Die Stroop-Aufgabe erfasst Inhibitionskontrollleistungen und die Aufgabenwechselaufgabe die Fähigkeit zum schnellen Umschalten zwischen Regeln und Entscheidungskriterien und damit die kognitive Flexibilität.

**(1b)** *In anspruchsvollen Aufgabenbedingungen ist der Leistungsunterschied (Reaktionszeiten, Fehlerraten) zwischen Probanden mit einer hohen und geringen kognitiven Reserve größer als in den einfachen Aufgabenbedingungen.*

**(1c)** *Die kognitive Reserve beeinflusst die Leistung (Reaktionszeiten, Fehlerraten) in der älteren Probandengruppe stärker als in der jüngeren Probandengruppe.*

Der Grad der Inanspruchnahme (zusätzlicher) exekutiver Ressourcen zur Aufgabenbearbeitung variiert in Abhängigkeit vom Alter der Probanden (Rypma et al., 2001), weshalb die untersuchten Personen zwei Altersgruppen zugeordnet wurden. Weiterhin zeigt die kognitive Altersforschung, „that performance differences between older and younger adults generally increase with greater task complexity“ (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005, S.190). So zeigten sich über Studien hinweg größere Alterseffekte für höhere im Vergleich zu geringerer Gedächtnisbelastung (Rypma et al., 2001). Alle Aufgaben beinhalten daher Bedingungen mit jeweils einer einfachen und höheren Anforderung an kognitive Funktionen. Es wird insgesamt davon ausgegangen, dass die Effekte der CR in der älteren Probandengruppe stärker ausgeprägt sind, weil einigen Untersuchungen zufolge nur in Risikogruppen positive Assoziationen zwischen neuronalen Strukturen/Funktionen (z. B. dem Glukosemetabolismus) bzw. kognitiven Leistungsvariablen und der CR beschrieben wurden (Roe et al., 2008; Arenaza-Urquijo et al., 2015).

**(1d)** *Probanden mit einer hohen kognitiven Reserve profitieren von der Wiederholungstestung und zeigen eine Leistungsverbesserung. Bei Probanden mit einer geringen kognitiven Reserve verschlechtert sich die Leistung oder bleibt erhalten.*

### *Elektrophysiologische Daten*

Neben Leistungsdaten (Reaktionszeiten, Fehlerraten) wurde während der Aufgabenbearbeitung ein EEG abgeleitet.

When using simple tasks that most participants can complete with little difficulty, it is not uncommon for groups with known differences in information processing to have equivalent behavior but dramatic differences in brain response (e.g., difference in younger and older adults). (Moreno et al., 2014, S.5)

**(2a)** *Aufgrund einer größeren neuronalen Effizienz und Kapazität weisen Personen mit einer hohen im Vergleich zur geringen kognitiven Reserve kleinere P3-Amplituden in einfachen, und größere P3-Amplituden in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen auf.*

In einer Reihe von Untersuchungen erwies sich die P3 als ein nützlicher Biomarker sowohl für den normativen Alterungsprozess als auch für Demenzerkrankungen (Rossini et al., 2007, O'Connell et al., 2012). In einer der ersten CR-Untersuchungen unter Einbezug des EEG im Rahmen einer Sternberg-Aufgabe zeigte sich die P3 ebenfalls als potentiell sensitiv gegenüber der CR (Speer & Soldan, 2015).

Stern diskutiert die neurale Effizienz und Kapazität als mögliche neurale Manifestationen der CR (Stern, 2009; Speer & Soldan, 2015, Kap. 2.3). Bei vergleichbarer Leistung würde ein effizienteres Netzwerk mit geringerem Ressourcenverbrauch arbeiten als ein weniger effizientes Netzwerk (López et al., 2014; Steffener & Stern, 2012; Van Dinteren et al., 2014; Daffner et al., 2011). Es wird daher angenommen, dass in leichteren Aufgaben Probanden mit einer hohen CR zur Erreichung vergleichbarer Leistung auf weniger Ressourcen zugreifen müssen als Gering-CR-Probanden (P3-Amplitude). In anspruchsvolleren Aufgabenbedingungen hingegen, würden Probanden mit hoher CR mehr Ressourcen heranziehen und höhere P3-Amplituden produzieren (Soldan & Speer, 2015), während Gering-CR-Probanden einen Mangel an Ressourcen aufweisen (Cappell et al., 2010).

**(2b)** *Eine hohe kognitive Reserve geht insgesamt und insbesondere in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen mit einer schnelleren mentalen Verarbeitungsgeschwindigkeit einher, weshalb kürzere P3-Latenzen zu erwarten sind.*

- (2c)** *Die hypothetisch angenommenen CR-abhängigen Unterschiede in der Allokation mentaler Ressourcen (Hypothese 2a, P3-Amplitude) sowie der mentalen Verarbeitungsgeschwindigkeit (Hypothese 2b, P3-Latenz) fallen aufgrund einsetzender Alterungsprozesse für die ältere Probandengruppe stärker aus.*
- (2d)** *Die Amplituden- und Latenzunterschiede in Abhängigkeit von der CR lassen sich nach zwei Jahren replizieren. Weiterhin wird eine altersbedingte Latenzverzögerung der P3 angenommen, die für Probanden mit einer hohen kognitiven Reserve in der Wiederholungsuntersuchung geringer ausfällt als für Probanden mit einer geringen kognitiven Reserve.*

Die P3-Latenz unterliegt in der untersuchten Altersspanne einer linearen Latenzzunahme (Van Dinteren et al., 2014), die nicht nur auf einen Latency-Jitter, sondern einen genuinen Alterungseffekt zurückzuführen ist (Walhovd, Rosquist & Fjell, 2008). Es wird bei bekannter Insensitivität gegenüber Aufgabenparadigmen (Van Dinteren et al., 2014) von einer aufgabenunabhängig geringeren P3-Latenz für die Hoch-CR-Gruppe ausgegangen, da u. a. ein besserer kognitiver Status und auch trainingsbasierte Leistungsverbesserungen mit kürzeren P3-Latenzen einhergehen (Hantz, Crummer, Wayman, Walton & Frisina, 1992; Verleger, Neukäter, Kömpf & Vieregge, 1991).

Ein weiteres übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Befundreplikation bei einer Follow-up-Untersuchung nach zwei Jahren.

- (2e)** *Kognitive Reserve steht im Zusammenhang zum Anterior-Shift der P3.*

Ein weiterer alterssensitiver Parameter der P3 ist der in zahlreichen Untersuchungen und bereits im Erwerbsalter über Aufgabenparadigmen hinweg beschriebene Anterior-Shift der P3, so u. a. auch in der Stroop- (Zurrón, Lindín, Galdo-Alvarez & Díaz, 2014; Mager et al., 2007), der Switch- (Adrover-Roig & Barcelo, 2009; Schapkin, 2012) oder der 2-back-Aufgabe (Wild-Wall, Falkenstein & Gajewski, 2011). Ähnlich der theoretischen Wirkweise der CR wird auch dem Anterior-Shift ein kompensatorischer Mechanismus zugeschrieben, der nicht nur im Zusammenhang mit einer Leistungserhaltung bei Gesunden, sondern ebenfalls mit der kognitiven Leistungserhaltung bei AD- (Grady et al., 2003) und

Schlaganfall-Patienten diskutiert wird (Buckner, 2005, S.275). Auf identische Weise wird die potentielle Wirkweise der CR beschrieben:

Neural compensation refers to situations where pathology (or age-related changes) afflicts primary task-related networks and necessitates the use of additional, compensatory networks to accomplish the same task. Individuals with higher levels of CR may be more capable of drawing on alternative neural networks in the face of brain changes in order to maintain function. (Barulli & Stern, 2013, S. 504)

Da weder die Wirkmechanismen der CR endgültig geklärt sind, noch warum bestimmte Personen einen Anterior-Shift vorweisen und andere nicht, wird der Zusammenhang zwischen der CR und dem Anterior-Shift der P3 explorativ untersucht. Für einen möglichen Zusammenhang sprechen bildgebende Studien an Gesunden, die nahelegen, dass Lifestyle-Faktoren insbesondere frontale Bereiche beeinflussen (Arenaza-Urquijo et al., 2015).

## 5 Methode

### 5.1 Stichprobe

Die untersuchte Stichprobe entstammt einer regionalen Teilstichprobe der Studie zur Mentalen Gesundheit bei der Arbeit (S-MGA), Repräsentativerhebung von rd. 4500 bei der Bundesagentur für Arbeit, zur Sozialversicherung gemeldeten Beschäftigten zum 31.12.2010 der Geburtsjahrgänge 1951 bis 1980. Dabei wurde bevölkerungsproportional eine die gesamte Bundesrepublik erfassende Gemeindestichprobe mit 222 Sample Points gezogen und auf der Grundlage der Beschäftigtenhistorie durch das Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) nach dem Zufallsprinzip eine geschichtete Ziehung der Arbeitnehmer vorgenommen (Schröder, Schiel, Schulz & Kleudgen, 2015). Im Rahmen der CAPI-(Computer Assisted Personal Interview)Erhebungen 2011–2012 wurde von den 425 Probanden im Raum Berlin und Dresden eine Bereitschaft erfragt, an einer arbeitsmedizinischen Zusatzuntersuchung zur körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit teilzunehmen, in die 296 (69.6 %) der Studienteilnehmer einwilligten. Die Berliner Teilstichprobe von insgesamt 143 Studienteilnehmern erhielt 2013 ein Informationsschreiben (Anhang A) über die anstehende arbeitsmedizinische Untersuchung (Vitalitätsdiagnostik nach Meißner-Pöthig & Michalak, 1997) und die Möglichkeit an einem psychophysiologischen Laborexperiment teilzunehmen. Nach der Sichtung der Interviewangaben zum Gesundheitsstatus wurden in einem ersten Schritt Probanden mit Angaben zu psychiatrischen, neurologischen sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen ausselektiert, wie auch solche, die auf eine regelmäßige, das zentrale Nervensystem beeinflussende Medikamenteneinnahme angewiesen waren. Von den verbleibenden telefonisch erreichbaren Studienteilnehmern wurden die aktuelle Teilnahmebereitschaft zur arbeitsmedizinischen Untersuchung, das Interesse an dem Laborexperiment sowie weitere Ausschlusskriterien (Anhang B) erfragt. Die vollständige Auflistung der Ausfallgründe bei der Erstuntersuchung nicht teilnehmender Probanden ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Die am Laborexperiment im Jahr 2013 teilnehmende Stichprobe von insgesamt 57 Personen wurde mithilfe eines Median-Splits ( $m = 45$ ) in zwei etwa gleich große Altersgruppen aufgeteilt. Die Gruppe der jungen Erwachsenen bildeten 29 Teilnehmer, davon 14 weiblichen Geschlechts ( $R = 34\text{--}45$  Jahre;  $M = 40.2$ ;  $SD = 3.2$ ), die ältere Erwachsenenengruppe setzte sich aus 28 Personen, davon 17 Personen weiblichen Geschlechts, zusammen ( $R = 46\text{--}62$  Jahre;  $M = 53.6$ ;  $SD = 5.7$ ).

Zum Ende des Experiments wurde von jedem Probanden eine schriftliche Einwilligungserklärung zur Zuspieldung der Interviewdaten (Anhang E) sowie zur weiteren Kontaktaufnahme für die Wiederholungstestung im Jahr 2015 (Anhang F) erbeten.

Bei der Wiederholungsuntersuchung konnten insgesamt 49 Probanden erneut getestet werden (28 jüngere,  $M = 42.0$ ,  $SD = 3.2$  und 21 ältere Probanden,  $M = 55.3$ ,  $SD = 5.4$ ).

Die nicht erneut untersuchten Probanden waren zum Teil nicht kontaktierbar, empfanden das Experiment als zu anstrengend oder wiesen gesundheitliche Probleme auf, die bereits im Vorfeld oder während des Experiments zum Ausschluss geführt haben.

Die Händigkeit wurde mittels Edinburgh Inventory of Handedness (Oldfield, 1971,  $M = 77.1$ ;  $SD = 44.3$ ) ermittelt.

Die Studienteilnahme wurde mit jeweils 200 Euro entschädigt.

**Tabelle 1.** Kontaktprotokoll der Berliner Teilstichprobe zum ersten Untersuchungszeitpunkt

| <b>Kontaktausgang</b>   | <b><i>N</i></b> | <b>%</b> |
|---|-----------------|----------|
| Person verzogen und es liegt keine gültige Telefonnummer vor  | 4               | 3        |
| Person reagiert nicht auf erneutes Anschreiben und es liegt keine gültige Telefonnummer vor                               | 12              | 8        |
| Person telefonisch nicht erreichbar   | 10              | 7        |
| Person verweigert Teilnahme aus Zeitgründen   | 6               | 4        |
| Person verweigert Teilnahme aus persönlichen Gründen (z. B. zu pflegende Angehörige; Nachtschichtarbeit, Schwangerschaft) | 8               | 6        |
| Person verweigert Teilnahme aus Krankheitsgründen, die nicht zu den Ausschlusskriterien gehören (z. B. Schmerzzustände)   | 7               | 5        |
| Person erfüllt eines oder mehrere Ausschlusskriterien (i.d.R. Hypertonie)   | 26              | 18       |
| Person hat kein Interesse   | 8               | 6        |
| Interesse nur an der arbeitsmedizinischen Untersuchung  | 5               | 3        |
| Teilnahme am Laborexperiment  | 57              | 40       |



## 5.2 Aufgabenset

Im Folgenden wird das für die vorliegende Untersuchung zusammengestellte Aufgabenset zur Erfassung der von Miyake et al. (2000) sowie Salthouse et al. (2003) beschriebenen und im Kapitel 3.1 theoretisch begründeten exekutiven Leistungsfunktionen (Arbeitsgedächtnis, kognitive Flexibilität und Inhibitionskontrolle) vorgestellt.

### 5.2.1 Erfassung der Arbeitsgedächtnisleistung

#### *N-back-Aufgabe*

Das erstmals von Kirchner (1958) eingeführte N-back-Paradigma ist ein oft eingesetztes Messinstrument zur Untersuchung von AG-Prozessen in neuropsychologischen Studien (Chen, Mitra & Schlaghecken, 2008; McEvoy, Pellouchoud, Smith & Gevins 2001). Dabei wird in kontinuierlicher, sequentieller Abfolge eine Serie von Reizen dargeboten, während jeder aktuelle Stimulus vom Probanden auf Übereinstimmung mit dem n Schritte zuvor dargebotenen Stimulus, zu prüfen ist. In der Regel kommen  $n = 1-3$  zum Einsatz (Owen, McMillan, Laird & Bullmore, 2005). Während  $n = 0$  als Kontrollbedingung ohne AG-Belastung fungiert, erfordern höhere  $n$  nicht nur ein kontinuierliches Online-Monitoring, sondern eine fortwährende Aktualisierung der AG-Inhalte sowie eine aktive Aufrechterhaltung zuvor dargebotener Stimuli im AG (Ragland et al., 2002). Unter sonst gleich bleibenden perzeptuellen und motorischen Bedingungen wird dadurch eine Schwierigkeitsmanipulation durch variierende AG-Belastung erreicht (Smith & Kosslyn, 2007). In den meisten N-back-Studien kommen verbale Stimuli, wie Buchstaben oder Wörter zum Einsatz, wobei auch Formen, Gesichter, Bilder und auditive sowie olfaktorische Reize verwendet wurden (Owen et al., 2005).

In der vorliegenden Untersuchung wurden 0-back- und 2-back-Aufgaben verwendet, die in einer vorausgegangenen Untersuchung an Personen im Erwerbsalter reliable Alterseffekte zeigten (Schapkin & Freude, 2014).

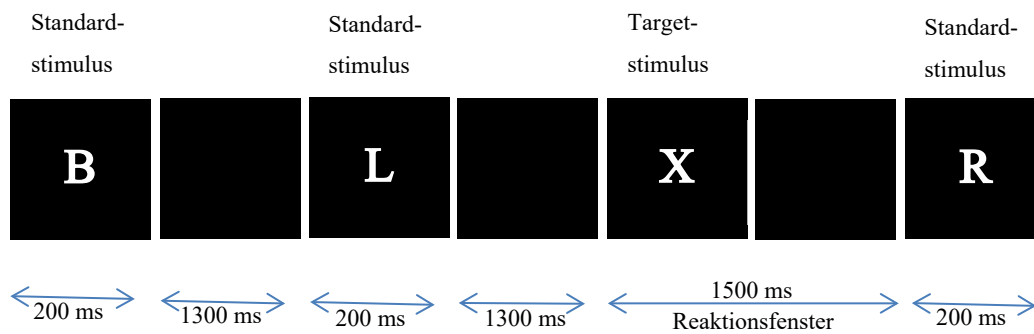
In beiden Bedingungen wurden vor einem schwarzen Bildschirmhintergrund, umrahmt von einem weißen Rahmen, seriell mit einem Interstimulusintervall von 1500 ms, die 25 (2-back-Aufgabe) bzw. 26 (0-back-Aufgabe) Großbuchstaben des deutschen Alphabets präsentiert (2.5 cm x 1.5 cm; Schapkin & Freude, 2014; Schapkin & Weißbecker-Klaus, 2015).

In der 0-back-Aufgabe (Abb. 4) waren die Probanden aufgefordert der Buchstabensequenz zu folgen und so schnell wie möglich, mit dem rechten Zeigefinger die Maustaste zu drücken,

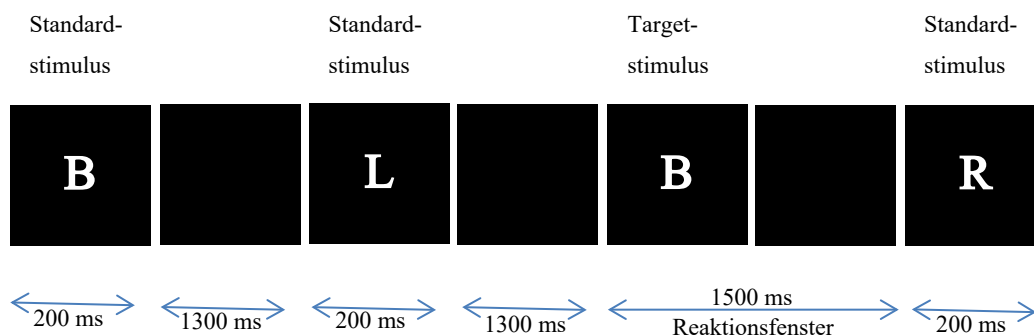
sobald der Buchstabe „X“ erschien. Die 0-back-Aufgabe bestand aus insgesamt 184 Buchstabenstimuli, wovon 38 reaktionsrelevante Targets waren.

In der 2-back-Aufgabe sollte die Maustaste möglichst schnell gedrückt werden, wenn ein zwei Schritte zuvor präsentierter Buchstabe wiederholt dargeboten wurde (Abb. 5). In dieser Aufgabe wurde auf den Buchstaben „X“ verzichtet. Die Gesamtstimulusanzahl betrug 202 Stimuli, davon 40 Targets.

In beiden Aufgaben betrug die Targetauftretswahrscheinlichkeit 20 %. Die ausbalancierten und pseudorandomisiert verteilten Standardstimuli in den Inter-Target-Intervallen (ITI) variierten in ihrer Anzahl jeweils zwischen 2 bis 6 Stimuli (Aufgabenbedingung 1: ITI = 2-3, Aufgabenbedingung 2: ITI = 4-6, vgl. Tab. 6).



**Abbildung 4.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge in der 0-back-Aufgabe



**Abbildung 5.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge in der 2-back-Aufgabe

### *Sternberg-Aufgabe*

In der Sternberg-Aufgabe (Sternberg, 1966) muss der Proband typischerweise ein Memory-Set von etwa 1 bis 6 visuellen oder auditiven (Standard-)Reizen im AG behalten und für den im Anschluss dargebotenen, reaktionsrelevanten Targetreiz entscheiden, ob dieser im Memory-Set vorkam oder nicht. Je nach Versuchsdesign werden nach der Darbietung eines Memory-Sets entweder mehrere (bis etwa 50) Targetreize nacheinander oder jeweils nur ein Targetreiz präsentiert (Wickens, Hyman, Dellinger, Taylor & Meador, 1986). Meist ist der Anteil im Memory-Set erhaltener und nicht erhaltener Targetreize identisch.

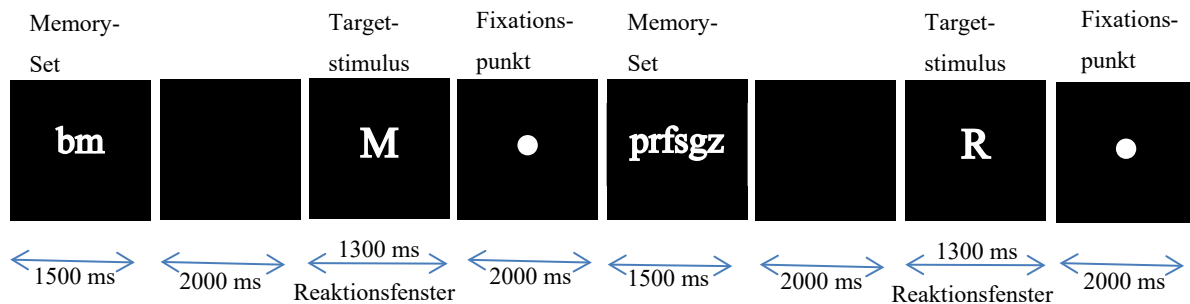
Dem Sternberg-Paradigma liegt ein serieller Vergleichsprozess zugrunde (Sternberg, 1966). Die Position des Suchreizes innerhalb des Sets ist für die Reaktionsgeschwindigkeit irrelevant. Das gesamte Set wird unabhängig von einer gefundenen Übereinstimmung vollständig durchsucht und mit dem Target abgeglichen bevor eine Reaktion erfolgt. Die Reaktionszeit steigt linear mit der Länge des Memory-Sets und ist für im Memory-Set enthaltene und nicht enthaltene Targets in etwa gleich. Die leichte Reaktionszeitverzögerung auf die im Set nicht vorgekommenen Targets ist für verschiedene Setlängen gleich und damit unabhängig von der Beanspruchung des AG (Sternberg, 1966). Dafür spricht auch die lineare Zunahme der P3-Latenz mit zunehmender Memory-Setlänge, während die Amplitudeneffekte eine stärkere Variabilität aufweisen (Pratt et al., 1989, nach Chao & Knight, 1997).

Für die aktuelle Untersuchung wurden zwei Versionen der Sternberg-Aufgabe konzipiert, die aufgrund unterschiedlicher Darbietung der Memory-Sets (simultan vs. sukzessiv) das AG in unterschiedlicher Art beanspruchen.

In der simultanen Sternberg-Aufgabe (Sternberg-(sim.)Aufgabe, Abb. 6) wurde in zufälliger Abfolge, umrandet von einem weißen Rechteckrahmen vor schwarzem Hintergrund, entweder ein Memory-Set von 2 oder 6 kleingeschriebenen weißen Buchstaben eingeblendet. Nach einer 2-sekündigen Pause erschien ein Großbuchstabe, über dessen Vorkommen im Memory-Set der Proband mittels eines Mausklicks so schnell wie möglich entscheiden sollte (vorhanden = rote Taste, rechter Zeigefinger; nicht vorhanden = grüne Taste, linker Zeigefinger). Anschließend erschien ein Fixationspunkt zur Fokussierung der Aufmerksamkeit und das nächste Set wurde eingeblendet.

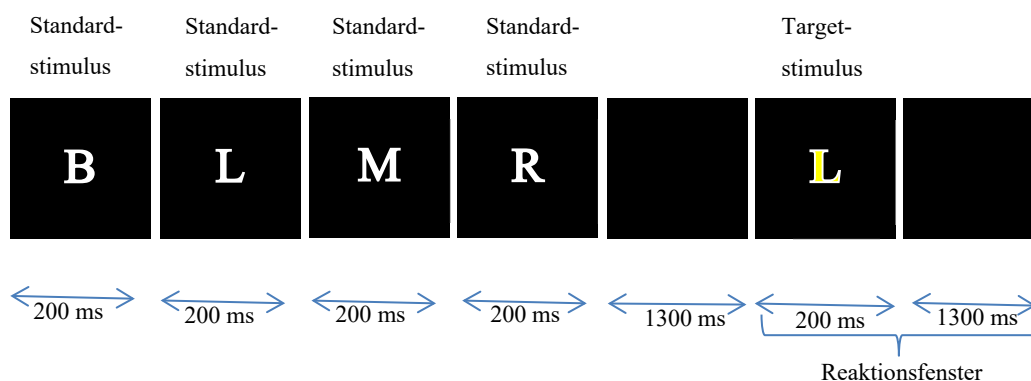
Durch den Großbuchstaben (Target) sollten sensorische Erinnerungseffekte mit den Kleinbuchstaben im Memory-Set vermieden werden. Als Buchstaben kamen nur Konsonanten zum Einsatz, um durch Silbenbildung mit Vokalen nicht die Effizienz und Kapazität des AG, zu beeinflussen (Schapkin & Weißbecker-Klaus, 2015; Wickens et al.,

1986). Die Aufgabe bestand aus insgesamt 82 Sets, davon 42 der Setlänge 2 (Aufgabenbedingung 1, leicht) und 40 der Setlänge 6 (Aufgabenbedingung 2, schwer). Insgesamt waren 50 % der Targets in den Memory-Sets enthalten.



**Abbildung 6.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge in der Sternberg-(simultan)Aufgabe

In der sukzessiven Sternberg-Aufgabe (Sternberg-(sukz.)Aufgabe) wurden im weißen Rahmen vor schwarzem Hintergrund weiße Großbuchstaben des Memory-Sets, bestehend aus 2 bis 6 Konsonanten, seriell eingeblendet. Nach jedem Memory-Set erschien ein gelber Großbuchstabe, über dessen Vor- bzw. Nichtvorkommen im Set die Probanden mittels Mausklick so schnell wie möglich entscheiden sollten (vorhanden = rote Taste, rechter Zeigefinger; nicht vorhanden = grüne Taste, linker Zeigefinger). Die Aufgabe bestand aus 40 Sets (6 x Setgröße 2; 8 x Setgröße 3; 10 x Setgröße 4; 10 x Setgröße 5 und 6 x Setgröße 6, Aufgabenbedingung 1: Setgröße 2-3, Aufgabenbedingung 2: Setgröße 4-6), die nach einer kurzen Pause (ca. 1 Minute) in identischer Weise wiederholt wurden. 50 % der Targetbuchstaben waren in den Memory-Sets enthalten. Die chronometrische Darbietungsabfolge ist der Abbildung 7 zu entnehmen.



**Abbildung 7.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge in der Sternberg-(sukzessiv)Aufgabe

### *AOSPAN-Aufgabe*

Die erstmals von Daneman und Carpenter (1980) eingesetzte Memory-Span-Aufgabe entwickelte sich zu einem etablierten Instrument zur Messung der AG-Kapazität, d. h. dem Ausmaß, in dem Informationen aufrechterhalten und aktualisiert werden können, während simultan eine weitere Aufgabe zu bearbeiten ist (Weldon, Mushlin, Kim & Sohn, 2013). Dabei sind die zu erinnernden Stimuli (z. B. Zahlen, Buchstaben, Wörter, Formen, Positionen) unter Bearbeitung der Distraktoraufgabe (z. B. Lesen, Rechnen, Zählen) zu memorieren und anschließend seriell, in der zuvor dargebotenen Reihenfolge wiederzugeben (Unsworth et al., 2005). Personen mit hohen Testscores besitzen eine gute Fähigkeit zur Aufrechterhaltung zielbezogener Inhalte und dem Umgang mit Reaktionskonflikten in interferenzreichen Situationen (Redick & Engle, 2011). Solcherart komplexe Aufgaben zur Erfassung der AG-Spanne erwiesen sich als wichtige Prädiktoren für zahlreiche kognitive Leistungen (Unsworth, Heitz, Schrock & Engle, 2005; Unsworth, Fukuda, Awh & Vogel, 2014) und für einen frühen Onset der AD (Rosen, Bergeson, Putnam, Harwell & Sunderland, 2002). Verschiedene eingesetzte Versionen der Memory-Span-Aufgaben sind durch eine gute interne Konsistenz, (Retest-)Reliabilität und Validität gekennzeichnet und sind reliable Indikatoren eines übergeordneten AG-Konstrukts.

In der aktuellen Arbeit wurde eine deutsche Version gemäß der automatisierten Ospan-Aufgabe nach Unsworth et al. (2005, AOSPAN, automated operation span task) verwendet, bei der Buchstaben bei abwechselndem Berechnen arithmetischer Aufgaben einzuprägen und entsprechend der Darbietungsreihenfolge wiederzugeben waren. Die Gesamtbearbeitungszeit betrug etwa 20 Minuten.

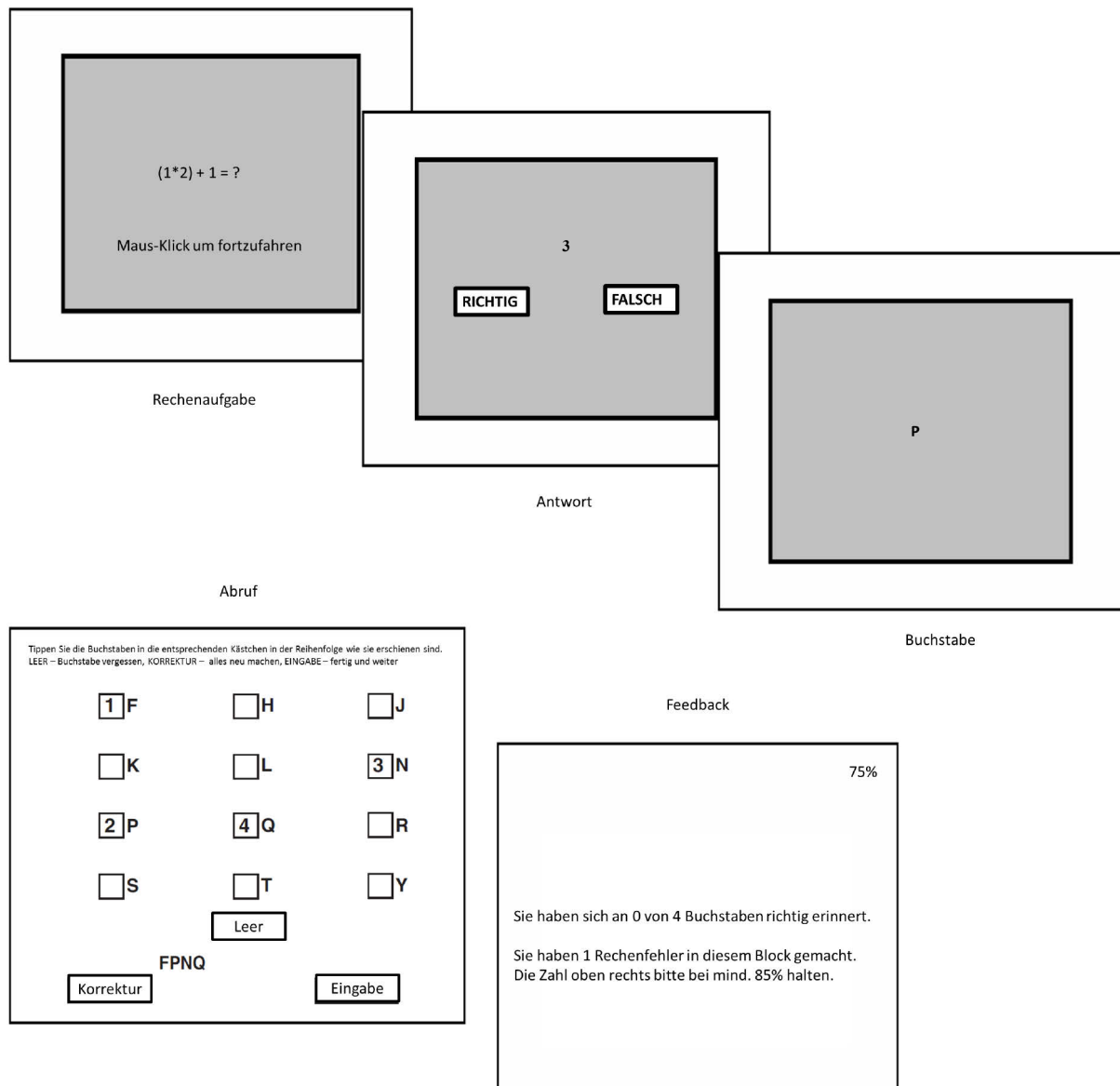
Die Aufgabe startete mit einem Trainingsblock bestehend aus drei Einheiten: Buchstaben memorieren, Rechnen und der Kombination aus dem Memorieren und Rechnen.

In der ersten Trainingseinheit wurden nach einer Instruktionsfolie zur Merkaufgabe nacheinander für jeweils 800 ms bis zu drei Buchstaben eingeblendet, die anschließend in der Abrufmatrix aus 12 Buchstaben in korrekter Reihenfolge per Mausklick auszuwählen waren. Es bestand die Möglichkeit durch das Einsetzen eines Platzhalters nicht erinnerte Buchstaben auszulassen sowie eine bereits eingegebene Buchstabenfolge zu löschen und erneut einzugeben. Die Eingabezeit blieb unlimitiert und wurde durch einen Klick auf den „Eingabe“-Button individuell beendet. Nach jedem Buchstabenset erschien ein Feedback über den Anteil richtig erinnerter Buchstaben.

Es schloss sich die zweite Trainingseinheit mit der Anweisung zu den Rechenaufgaben an. Der Proband wurde instruiert, die Aufgabe (z. B.  $(5*6)-4 = ?$ ) so schnell wie möglich im Kopf zu berechnen und mit einem Mausklick fortzufahren. Das daraufhin vorgeschlagene Rechenergebnis sollte durch einen Mausklick auf den „richtig“- bzw. „falsch“-Button bewertet werden. Es folgte ein Feedback über die Korrektheit der Auswahl. Insgesamt umfasste dieser Übungsteil 15 Rechenaufgaben. Die mittlere Bearbeitungszeit für das Kopfrechnen bestimmte das Zeitlimit (+ 2.5 SD) des Reaktionsfensters in der nachfolgenden kombinierten Anforderung aus den beiden zuvor geübten Aufgabenteilen.

Die letzte Trainingseinheit vereinte die ersten beiden Übungen und begann nach der Instruktion mit einer Rechenaufgabe, die in bereits trainierter Weise zu bearbeiten war. Wurde jedoch diesmal das Zeitlimit überschritten, galt die Lösung als falsch und es folgte unmittelbar der erste einzuprägende Buchstabe, der nach 800 ms von der zweiten Rechenaufgabe abgelöst wurde, auf die der zweite Buchstabe folgte. Nach dem letzten Buchstaben des Sets erschien die Abrufmatrix, in die entsprechend des ersten Trainingsblocks die Buchstaben einzugeben waren. Der Durchgang endete mit einer Feedbackfolie, die sowohl den Anteil erinnerter Buchstaben als auch die Anzahl der Rechenfehler zurückmeldete. Insgesamt umfasste die kombinierte Trainingseinheit drei Durchgänge der Setgröße zwei. Die Darbietungsabfolge ist der Abbildung 8 zu entnehmen.

Die anschließende Testphase setzte sich aus insgesamt 15 Durchgängen mit jeweils 3 Sets der Setgrößen 3 bis 7 und somit insgesamt 75 Buchstaben und 75 Rechenaufgaben zusammen, die jedem Probanden in zufälliger Reihenfolge dargeboten wurden. Im Unterschied zur kombinierten Trainingseinheit war zudem eine Rechengenauigkeit von mind. 85 % einzuhalten, an die der Proband in jeder Feedbackfolie durch eine schriftliche Aufforderung und das Einblenden der aktuellen Rechengenauigkeit in Prozent erinnert wurde. Das 85-Prozent-Kriterium sollte sicherstellen, dass die Distraktoraufgabe gewissenhaft bearbeitet wird. Das gesetzte Zeitlimit für die Berechnung der Rechenaufgabe hatte zum Ziel, das mentale Wiederholen der Buchstaben während der Distraktortätigkeit zu verhindern. Des Weiteren hat sich erwiesen, dass bei einer fehlenden zeitlichen Limitierung der Distraktoraufgabenbearbeitung keine komplexe kognitive Leistung vorhergesagt werden konnte (Friedman & Miyake, 2004; Clair-Thompson, 2007).



**Abbildung 8.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge in der AOSPAN-Aufgabe (in Anlehnung an Unsworth et al., 2005)

Die Leistung der AOSPAN-Aufgabe wird entweder als der Absolutscore (Anzahl der vollständig erinnerten Buchstaben-Sets) oder als Partialscore (Anzahl der richtig erinnerten Buchstaben an korrekten Positionen) angegeben. Während der Absolutscore aus theoretischer Sicht vorzuziehen ist, stellt der Partialscore aus psychometrischer Sicht mit einer höheren internen Konsistenz, Trennschärfe, Test-Retest-Korrelationen und Korrelationen zwischen verschiedenen Memory-Span-Aufgaben die bessere Alternative zur reliablen und sensitiven Ermittlung individueller Differenzen dar (Redick et al., 2012).

### 5.2.2 Erfassung der Inhibitionsleistung

Die Unterdrückung aufgabenirrelevanter interner und/oder externer Informationsinhalte ist für ein zielgerichtetes und effektives Handeln von großer Bedeutung. Ein gut funktionierendes Inhibitionssystem kontrolliert den Informationseintritt und die Verweildauer eintreffender Informationen im AG und ermöglicht effiziente Prozessabläufe (Hasher & Zacks, 1988).

Der Stroop-Color-Word-Test (Stroop, 1935) ist eine typische und in verschiedenen Versionen eingesetzte Aufgabe zur Erfassung der Unterschiede in den Inhibitionsprozessen, der selektiven Aufmerksamkeit und der exekutiven Kontrolle (MacLeod, 1991; Davidson, Zacks & Williams, 2003).

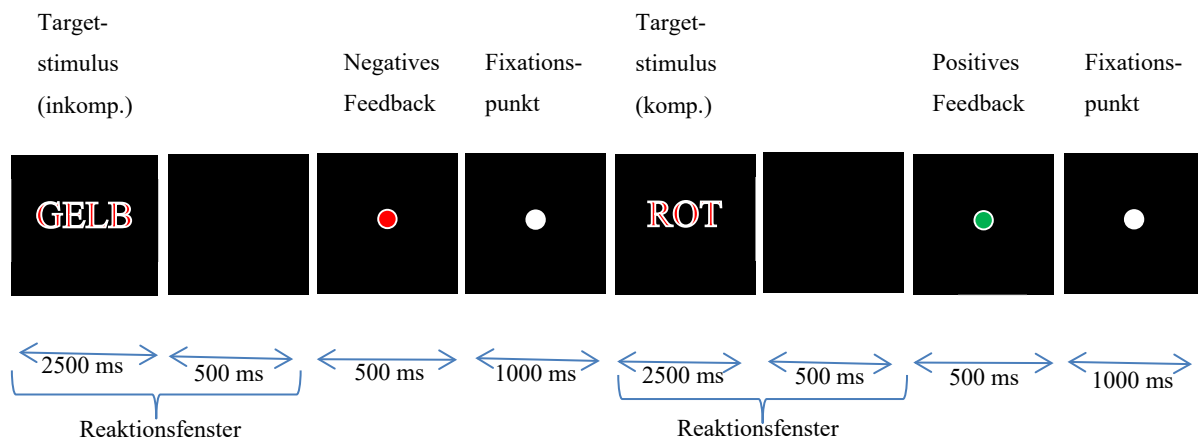
In der Originalversion kommen drei Subtests zum Einsatz. Für die vorliegende Arbeit wurde eine Version des dritten Subtests verwendet, in der Farbnamen (rot, grün, blau, gelb) in einer nicht dem Wort entsprechenden Schriftfarbe (inkongruente Bedingung; z. B. das Wort „grün“ in blauer Farbe) im zufälligen Wechsel mit Farbnamen übereinstimmender Schriftfarbe (kongruente Bedingung, z. B. das Wort „rot“ in roter Farbe) dargeboten wurden. Die Aufgabe bestand darin, die Wortbedeutung zu ignorieren und die farblich korrespondierende Maustaste zu drücken. Während in der kongruenten Bedingung die Wort- und Farbinformationen übereinstimmen und der automatisierte Prozess des Lesens zur schnellen und korrekten Reaktion genutzt werden kann, müssen in der inkongruenten Bedingung kognitive Kontrollmechanismen, zur Inhibition des Leseprozesses und dem Abruf der Farbeigenschaft, aktiviert werden (Bugg, Jacoby & Toth, 2008). Typischerweise wird in der inkongruenten Aufgabenbedingung, im Vergleich zu einer neutralen oder kongruenten Bedingung, eine Zunahme der Reaktionszeit um etwa 100–200 ms (Verleger, 1997) sowie ein Anstieg der Fehlerquote beobachtet, was als Stroop-Effekt bekannt ist (Davidson et al., 2003). Der Stroop-Interferenzeffekt wurde nicht nur für Farbwörter, sondern unter anderem auch für Symbole, Positionen, Buchstaben und Mengen (z. B. Shor, 1971; Fox, Shor & Steinman, 1971, Regan, 1978) sowie für verschiedene In- und Outputmodalitäten beschrieben (Überblick siehe MacLeod, 1991).

Mit zunehmendem Lebensalter ist eine Zunahme der Stroop-Interferenz mit verlängerten Reaktionszeiten und steigenden Fehlerraten zu verzeichnen (Cohn, Dustman & Bradford, 1984; Davidson et al., 2003; Kwong See & Ryan, 1995). Des Weiteren konnte im Sinne der CR-Hypothese eine ausgeprägtere altersabhängige Leistungsabnahme für Personen mit einer geringen Schulbildung beschrieben werden (Van der Elst, Van Boxtel, Van Breukelen & Jolles, 2006). Weitere Untersuchungen zeigen bereits im mittleren Lebensalter wie auch im



beginnenden Rentenalter, Veränderungen in der zentral-nervösen Informationsverarbeitung während der Darbietung inkongruenter Stroop-Stimuli (Mager et al., 2007; Zurrón et al., 2014).

Ausgehend davon wird in der aktuellen Studie eine Sensitivität der Stroop-Aufgabe für eine EEG-basierte Untersuchung altersabhängiger exekutiver Leistungen im Zusammenhang mit der CR angenommen. Insgesamt wurden 82 Stimuli dargeboten, von denen 41 inkongruent waren. Die chronometrische Abfolge der Stroop-Aufgabenstimuli ist der Abbildung 9 zu entnehmen.



**Abbildung 9.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge in der Stroop-Aufgabe

### 5.2.3 Erfassung der kognitiven Flexibilität

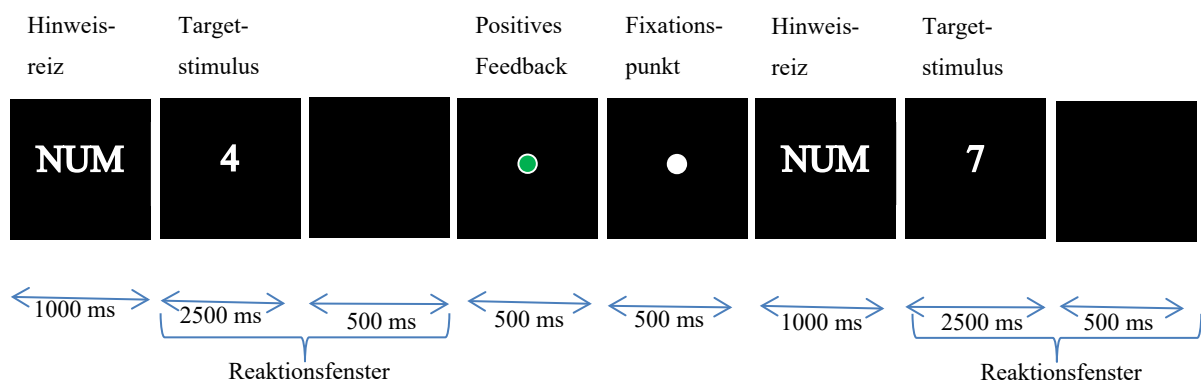
Neben der Inhibition aufgabenirrelevanter Reize und dem Aufrechterhalten sowie Aktualisieren von AG-Inhalten, sind in vielen Arbeitssituationen kognitive Umstellungsprozesse durch Aufgabenwechsel erforderlich. Die Fähigkeit zum flexiblen Wechseln von Zielen und dem Umschalten zu einer neuen Verarbeitungsregel wurden vielfach im Rahmen des sog. Aufgabewechselparadigmas (Jersild, 1927; Spector & Biederman, 1976; Allport et al., 1994; Rogers & Monsell, 1995) untersucht.

Häufig kommen mehrere Aufgabenblöcke zum Einsatz. Ein Block ohne Aufgabenwechsel (Kontrollbedingung), in dem die Aufgabe in jedem Trial nach derselben Regel zu bearbeiten ist, und ein Block mit Aufgabenwechsel, in dem mehrere Bearbeitungsregeln im Wechsel auf identische (bivalente) oder unterschiedliche (univalente) Reize mit identischen oder unterschiedlichen Reaktionsalternativen anzuwenden sind. Dabei kann der Aufgabenwechsel in einer einfachen oder komplexen Sequenz erfolgen, regulär in fester Abfolge oder irregulär,

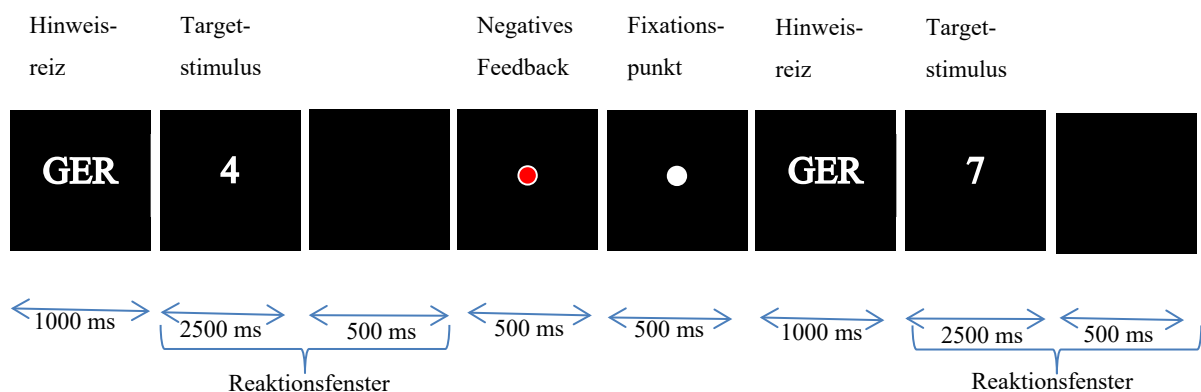
mit oder ohne einen Hinweis zur Regel (Spector & Biederman, 1976) oder einem Signal zum Aufgabenwechsel. Zudem unterscheiden sich die angewendeten Aufgabenwechselparadigmen in der Länge und der Variabilität der Vorbereitungszeit vor dem Aufgabenwechsel und der Anzahl an im Wechsel anzuwendenden Bearbeitungsregeln.

In der verwendeten Version des Aufgabenwechselparadigmas sollten auf bivalente numerische Reize (Zahlen 1–4 und 6–9) mit gleichen Reaktionsalternativen (rote Taste, rechter Zeigefinger; grüne Taste, linker Zeigefinger) zwei Bearbeitungsregeln (NUM = Zahl  $>/<$  5; GER = Zahl gerade/ungerade) in einer fest vorgegebenen, zuvor einzuprägenden Wechselsequenz (NUM – NUM – GER – GER – NUM – NUM) angewendet werden.

Beide Bearbeitungsregeln wurden zunächst in homogenen Blöcken ohne Aufgabenwechsel bearbeitet (Abb. 10–11). Im numerischen Block (NUM) sollte bei einer Zahl  $<$  5 die grüne Taste und bei einer Zahl  $>$  5 die rote Taste gedrückt werden. Bei der Beurteilung der Gradzahligkeit (GER) sollte bei ungeraden Zahlen die grüne und bei geraden Zahlen die rote Taste gedrückt werden.

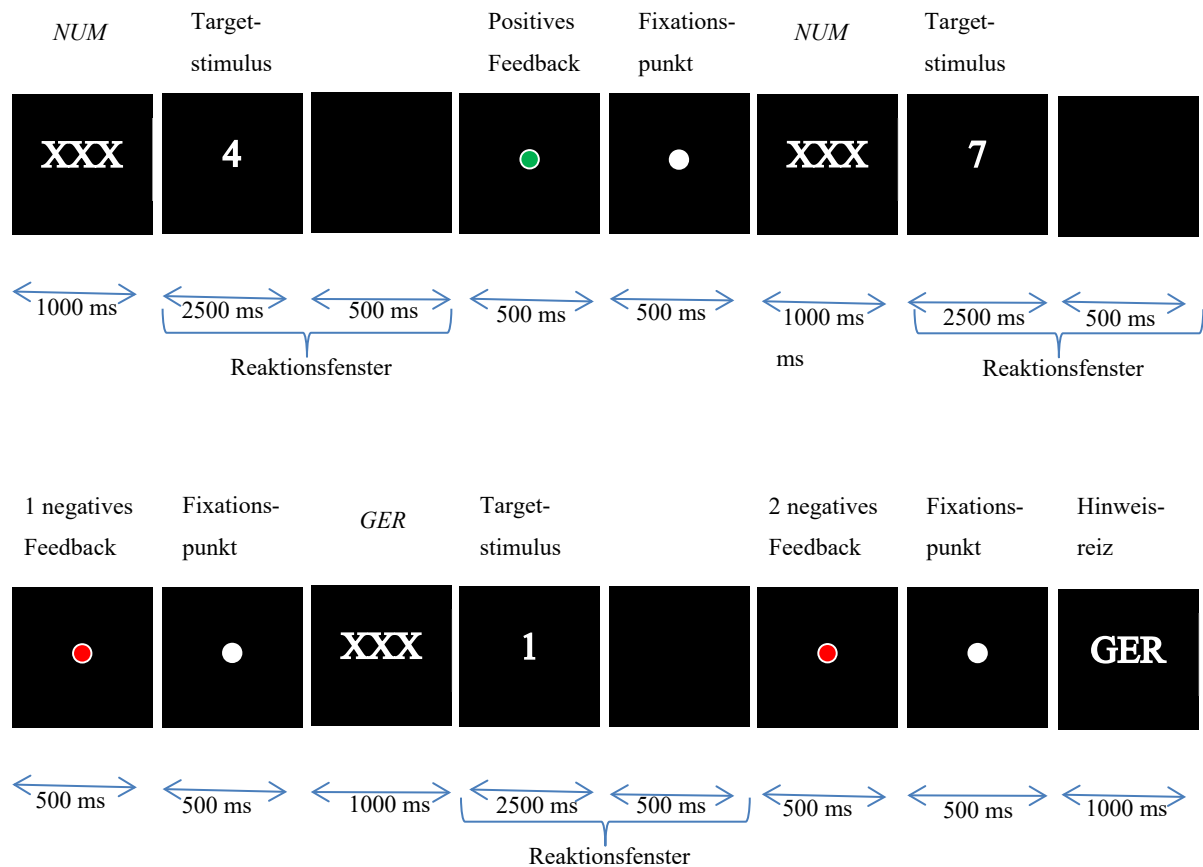


**Abbildung 10.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge im NUM-Block der Switch-Aufgabe



**Abbildung 11.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge im GER-Block der Switch-Aufgabe

Im heterogenen Block (XXX) blieben die beschriebenen Reaktionsregeln erhalten, sollten jedoch im festen Wechsel (NUM – NUM – GER – GER – NUM – NUM) aus dem Gedächtnis heraus angewendet werden. Lag in zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen die Reaktion außerhalb des Reaktionsfensters oder folgten zwei falsche Antworten aufeinander, wurden statt der Maske XXX die zwei Hinweise (NUM oder GER) gemäß der Sequenz eingeblendet (Abb. 12).



**Abbildung 12.** Schematische Darstellung der Stimulusabfolge im XXX-Block der Switch-Aufgabe

In jedem Block wurde nach dem Erscheinen des entsprechenden Hinweises (NUM, GER oder XXX) in einem Rechteckrahmen weiß auf schwarzem Hintergrund für 2.5 s eine Zahl (2 cm x 1 cm) eingeblendet. Der Proband hatte insgesamt 3 s Zeit bevor ein grüner (richtig) bzw. roter (falsch) Feedbackkreis für 500 ms die Richtigkeit seiner Reaktion zurückmeldete. Der Feedbackkreis wurde anschließend weiß und blieb als Fixationspunkt für weitere 500 ms im Rahmen bevor für 1s der nächste Hinweis erschien.

Der Aufgabenwechselblock XXX bestand aus 130 Trials, die sich zu gleichen Anteilen auf die Aufgaben NUM und GER sowie die jeweiligen Aufgabenbedingungen </> 5 bzw.

gerade/ungerade aufteilen. Die aus jeweils 65 Trials bestehenden homogenen Non-switch-Aufgaben NUM bzw. GER gingen nicht in die Datenauswertung ein.

Früheren Studien zufolge fallen Reaktionszeiten und Fehlerraten in Aufgabenwechselblöcken für Wiederholungstrials (NUM – NUM – GER – **GER** – NUM – **NUM**) geringer aus als für die Wechseltrials (**NUM** – NUM – **GER** – GER – **NUM** – NUM; lokale Wechselkosten), wenngleich höher als in homogenen Kontrollblöcken (globale Wechselkosten). Viele Untersuchungen berichten höhere globale Wechselkosten für ältere Probanden, während für lokale Wechselkosten in der Regel keine Altersunterschiede gefunden werden, wenn durch Training das Leistungsausgangsniveau angeglichen wird.

Interessanterweise fanden Schapkin, Gajewski und Freude (2014) geringere lokale Wechselkosten für ältere Arbeitnehmer, die jedoch auf verlängerte Reaktionszeiten in Wiederholungstrials zurückzuführen waren.

Um Leistungsunterschiede über die Aufgaben hinweg vergleichen zu können, wurden die Reaktionszeiten sowie Fehlerraten der Wiederholungs- und Wechseltrials separat betrachtet. Auf die übliche Berechnung der Wechselkosten wurde verzichtet.

### 5.3 Erfassung der kognitiven Reserve

Die Zusammenstellung der Variablen und Items zur Erfassung einzelner Komponenten der CR erfolgte literaturbasiert. Da jedoch unklar ist welche Subkomponenten besonders stark zur CR beitragen, wurden mehrere Variablen zur möglichst robusten Schätzung eingesetzt (Valenzuela et al., 2011). Die Fragebögen zur Erfassung der CR sind im Anhang C zu finden.

#### *Bildung*

Der Bildungsgrad wurde durch die Angabe des jeweils höchsten allgemeinbildenden Schulabschlusses über die Wahl der vorgegebenen 7 Kategorien erfasst. Es erfolgte eine Umrechnung der Skala in die Anzahl der Bildungsjahre, die zum zweiten Messzeitpunkt durch eine separate schriftliche Abfrage verifiziert wurde. Drei (5.3 %) Probanden besuchten die Schule weniger als 9 Jahre (vgl. repräsentative CAPI-Gesamtstichprobe 28.3 %), 18 (31.6 %) Probanden 10 Jahre (vgl. CAPI 39.7 %), 3 (5.3 %) Probanden 12 und 33 Probanden 13 Jahre (58 %, vgl. CAPI 12–13 Schuljahre 32.0 %). Durch das Zusammenlegen von

Probanden mit 8–10 sowie 12–13 Jahren Schulbildung konnten die Studienteilnehmer zwei Bildungsgraden zugeordnet werden.

Der Ausbildungsabschluss wird seltener als eine Komponente der CR miterfasst, wurde jedoch in dieser Arbeit aufgrund der hohen mehrjährigen kognitiven Beanspruchung und empirischer Evidenz für eine Beteiligung am Aufbau der CR, miterhoben (Feinkohl et al., 2017; Sattler, 2011). Eine Lehre/Ausbildung beendeten 43.9 % (n = 25) der Stichprobe. Einen Fachhochschulabschluss (FH) besaßen 10.5 % (n = 6, vgl. CAPI 8.5 %) und 38.6 % (n = 22) hatten einen Hochschulabschluss (vgl. CAPI 12.3 %). Die Variable Ausbildung wurde wie folgt gestuft: 0 = keine Ausbildung; 1 = Ausbildung/Lehre; 2 = FH-Studium; 3 = Universitätsstudium.

### *Beruf*

Für die Bestimmung der für die CR relevanten Berufseigenschaften wurden zwei Berufsmerkmale erhoben – die Relation zwischen geistigen und körperlichen Arbeitsprozessen sowie die Berufskomplexität des jeweils am längsten ausgeübten Berufs.

Die Relation zwischen geistigen und körperlichen Arbeitsprozessen wurde dem CAPI-Interview entnommen, in dem die Probanden angaben, ob sie „bei Ihrer Arbeit vorwiegend geistig, körperlich oder etwa gleichermaßen geistig und körperlich tätig sind“. 36 Probanden (63.2 %) gaben an, vorwiegend geistig (vgl. CAPI 45.7 %), fünf Probanden (8.8 %) vorwiegend körperlich (vgl. CAPI 12.1 %) und 16 Probanden (28.1 %), in etwa „gleichermaßen geistig und körperlich tätig“ zu sein (vgl. CAPI 42.1 %).

Die Bestimmung der Berufskomplexität wurde auf der Grundlage der Kodierung nach der deutschen Klassifikation der Berufe K1dB 2010 durchgeführt (Prigge et al., 2014). Das Anforderungsniveau, welches durch die 5. Stelle im Berufscodex definiert wurde, erlaubte eine Einteilung der jeweiligen Berufe in vier Kategorien: Helfer- und Anlern Tätigkeiten, kurz „Helfer“ (n = 5; 8.8 %), fachlich ausgerichtete Tätigkeiten, kurz „Facharbeiter“ (n = 21; 37 %), komplexe Spezialtätigkeiten, kurz „Spezialisten“ (n = 11; 19.3 %) und hochkomplexe Tätigkeiten, kurz „Experten“ (n = 20; 35.1 %). Durch das Zusammenlegen der Helfer- und Facharbeiter (wenig komplex, 45.8 %) sowie der Spezialisten und Experten (hoch komplex, 54.4 %) wurden zwei Berufskomplexitätsgruppen gebildet.

### *Bilingualismus*

Das Vorliegen eines Bilingualismus wurde mithilfe von drei Fragen mit dichotomen Antwortkategorien (ja vs. nein) erfasst. 39 % ( $n = 22$ ) der Stichprobe gaben an, mindestens zwei Sprachen flüssig zu sprechen. 10 davon bejahten eine regelmäßige Nutzung der Zweitsprache im Alltag, 5 machten zudem die Angabe, die Zweitsprache regelmäßig im Alltag seit ihrer Kindheit und/oder seit mehr als der Hälfte ihres Lebens zu nutzen. Da 61 % ( $n = 35$ ) der Stichprobe kein flüssiges Sprechen einer Zweitsprache berichteten, wurden die Probanden zwei Gruppen zugeteilt (flüssiges Beherrschen einer Zweitsprache vs. kein flüssiges Beherrschen einer Zweitsprache), ohne weitere Abstufung des Bilingualismus.

### *Instrumentalunterricht*

Das Erlernen eines Musikinstruments in der Vorgeschichte wurde mittels zwei Fragen mit geschlossenem Antwortformat erhoben. Die Frage danach, ob in der Kindheit oder Jugend ein Instrument erlernt wurde (ja vs. nein), konnten 48 % ( $n = 27$ ) der Stichprobe bejahen. Anschließend wurden die Probanden gebeten, eine der vier Kategorien zur Dauer des Instrumentalunterrichts in Jahren anzukreuzen ( $<5$ ,  $<7$ ,  $<9$  und  $>9$ ). 33.3 % ( $n = 22$ ) gaben eine Dauer unter 5 Jahren an, während auf die restlichen drei Kategorien jeweils zwischen 2 und 4 Probanden entfielen. Ähnlich dem Bilingualismus wurden unabhängig von der Dauer des Instrumentalunterrichts zwei Gruppen nach dem Vorliegen einer Unterrichtserfahrung gebildet.

### *Soziale Freizeitaktivitäten*

Zur Schaffung einer gemeinsamen Ausgangsbasis gaben die Probanden vor der Bearbeitung der Fragebögen zu sozialen und kognitiven Aktivitäten eine Schätzung über die Ihnen potentiell zur Verfügung stehende Zeit für Freizeitaktivitäten ab, in dem sie die Stundenanzahl außerhalb ihrer Berufstätigkeit und der Nachtruhe in den letzten 4 Wochen errechneten.

Das Ausmaß der sozialen Freizeitgestaltung (Soz1–Soz6) wurde initial mit sechs Items erhoben (Soz1 private Besuche, Soz2 soziale Netzwerke/Emails, Soz3 Einkaufsbummel mit anderen, Soz 4 zum Essen ausgehen, Soz5 Clubs/Bars/Disko/Kneipen, Soz6 Telefonieren). Das Item Soz5 (Clubs/Bars/Disko/Kneipen) musste aufgrund negativer Korrelationen ( $r = -.14$  bis  $r = -.04$ ) zu allen sonst positiv interkorrelierten restlichen Items

( $r = .02$  bis  $r = .38$ ) sowie einer geringen Antwortfrequenz (80 % unter 4 Stunden/Monat) und damit nicht vorhandener Relevanz für die untersuchte Stichprobe, eliminiert werden. Auch wenn die interne Konsistenz der Aktivitätenliste aufgrund der Diversität der Aktivitäten und geringer Itemanzahl keine hohen Werte erwarten ließ, stieg das Cronbachs alpha nach dem Ausschluss von Soz5 von .13 auf .5 an und kann als zufriedenstellend beurteilt werden (vgl. Hall et al., 2009). Die verbleibenden Items (Soz1, Soz2, Soz3, Soz4 und Soz6) wurden einer Faktorenanalyse zugeführt (Obliminrotation), die zwei inhaltlich zugrundeliegende Faktoren vermuten ließ. Vermutlich könnte diesen eine Ausrichtung der sozialen Interaktionen auf die Hausgemeinschaft/Verwandschaft einerseits (Faktorladungen Faktor1: Soz1 (.77), Soz6 (.73)) und auf den Freundes-/Bekanntenkreis (Faktorladungen Faktor2: Soz2 (.77), Soz3 (.57), Soz4 (.78)) andererseits zugrunde liegen. Pro Item wurden drei etwa gleichgroße Gruppen gebildet und jeweils mit 0 für geringe Aktivität, 1 für mittelhohe und 2 für eine hohe Aktivität kodiert (siehe Tab. 2). Anschließend wurde ein Summenscore zwischen 0–10 Punkten errechnet ( $M = 5.4$ ;  $SD = 2.5$ ) und die Probanden mittels eines Mediansplits (= 5) zwei Gruppen zugeordnet („gering sozial Aktive“ 0–5 Summenpunkte; „hoch sozial Aktive“ 6–10 Summenpunkte).

**Tabelle 2.** Punktezuteilung nach Item und geschätzter Stundenzahl zur Bildung des Summenscores „soziale Aktivität“

| Items             | Punkte  |
|-------------------|---|
| <i>Soz1</i>       | 0 ≤ 10 Stunden; 1 = 11–21 Stunden; 2 > 21 Stunden |
| <i>Soz2</i>       | 0 = 0–1 Stunden; 1 = 2–9 Stunden; 2 > 9 Stunden   |
| <i>Soz3</i>       | 0 = 0 Stunden; 1 = 1–3 Stunden; 2 > 3 Stunden     |
| <i>Soz4, Soz6</i> | 0 = 0–3 Stunden; 1 = 4–9 Stunden; 2 > 9 Stunden   |

### *Kognitive Freizeitaktivitäten*

Die Liste zur Erfassung der Frequenz mental-kognitiver Freizeitaktivitäten war ähnlich aufgebaut wie der Fragebogen zu den sozialen Freizeitaktivitäten. Es wurden die mit folgenden neun Aktivitäten verbrachten Stunden in den letzten vier Wochen erfragt: Ment1 Kulturveranstaltungen, Ment2 Kurse, Ment3 Informationsveranstaltungen, Ment4 Bibliotheksbesuche, Ment5 Lesen, Ment6 PC-Arbeit, Ment7 Denkaufgaben, Ment8

Hörbücher/Wortsendungen, Ment9 Fernsehdokumentationen. Anschließend folgte eine datengeleitete Itemselektion. Ment4 zeigte eine sehr geringe Streuung bei einem Mittelwert von knapp 1 Stunde ( $M = 0.8$ ;  $SD = 1.7$ ). Entgegen der Erwartung war zudem die in der Bibliothek verbrachte Zeit nicht mit der Lesezeit (Ment5) korreliert ( $p = -.07$ ) und führte zum Ausschluss des Items. Die angegebene Zeit für Fernsehdokumentationen (Ment9) lag für einige Probanden so hoch ( $n = 4$ , 50–90 Stunden), dass davon ausgegangen werden musste, dass eine Überschneidung zum Gesamtfernsehkonsument vorlag. Es gibt Untersuchungen, die den Fernsehkonsum in der Reihe mental stimulierender Aktivitäten untersuchen, während andere negative Assoziationen zur Kognition und sogar ein erhöhtes Demenzrisiko berichten (Aronson, 1993; Hertzog, Kramer, Wilson & Lindenberger, 2008). Aus diesem Grund wurde ein Umpolen von Ment9 in Erwägung gezogen und die Assoziationen zum Raven-Matrizen-Test (Raven, 1938) und dem ZST (Zahlensymboltest, Von Aster, Neubauer, & Horn, 2006) errechnet. Die Intelligenz einer Person wird in der Literatur regelmäßig als eine Proxy-Variable der CR eingesetzt, weshalb auch hier die vergleichende Betrachtung gerechtfertigt ist. In der aktuellen Untersuchung wurde jedoch darauf verzichtet, Intelligenz in der Reihe der CR-Komponenten zu untersuchen, weil der Fokus auf aktiv veränderbare Variablen gelegt wurde. Unter Ausschluss von Ment9 betrug die Korrelation zwischen dem mentalen Gesamtaktivitätsscore und Raven  $r = .25$  ( $p = .06$ ), für das positiv gepolte Item lag der Korrelationskoeffizient bei  $r = .15$  ( $p = .26$ ) und für das umgepolte Item bei  $r = .32$  ( $p = .02$ , sign.). Zwischen dem mentalen Gesamtaktivitätsscore und ZST lag die Korrelation bei  $r = .13$  ( $p = .04$ ) unter Ausschluss des Items, für das positiv gepolte Item bei  $r = .00$  ( $p = .99$ ) und bei  $r = .24$  ( $p = .07$ ) für das umgepolte Item. Es wurde entschieden Ment9 umzupolen, wodurch Probanden mit einem hohen Fernsehkonsum eine geringere Wertung erhielten. Die Interitemkorrelationen lagen insgesamt zwischen  $r = -.14$  bis  $r = .35$  und lassen annehmen, dass das Nachgehen einer Aktivität nicht zwangsläufig mit einer höheren Teilhabe in einer anderen Aktivität einhergeht. Zur Errechnung des Gesamtscores für kognitive Aktivitäten wurden vergleichbar zu den Soz-Items jeweils pro Ment-Item entsprechend der angegebenen Stundenzahl drei (Ment5, Ment6, Ment8, Ment9) und bei geringer Streuung (Ment1–Ment3, Ment7) zwei Aktivitätsstufen ermittelt und jeweils mit 0 (geringe Ausprägung) bis 2 (hohe Ausprägung) Punkten kodiert. Es ergab sich ein Summenscore zwischen 0–10 Punkten ( $M = 5.5$ ;  $SD = 2.26$ ), der die Probanden mittels Mediansplit ( $= 5$ ) zwei kognitiven Aktivitätsstufen zuordnen ließ („gering mental Aktive“ 0–5 Summenpunkte; „hoch mental Aktive“ 6–10 Summenpunkte).

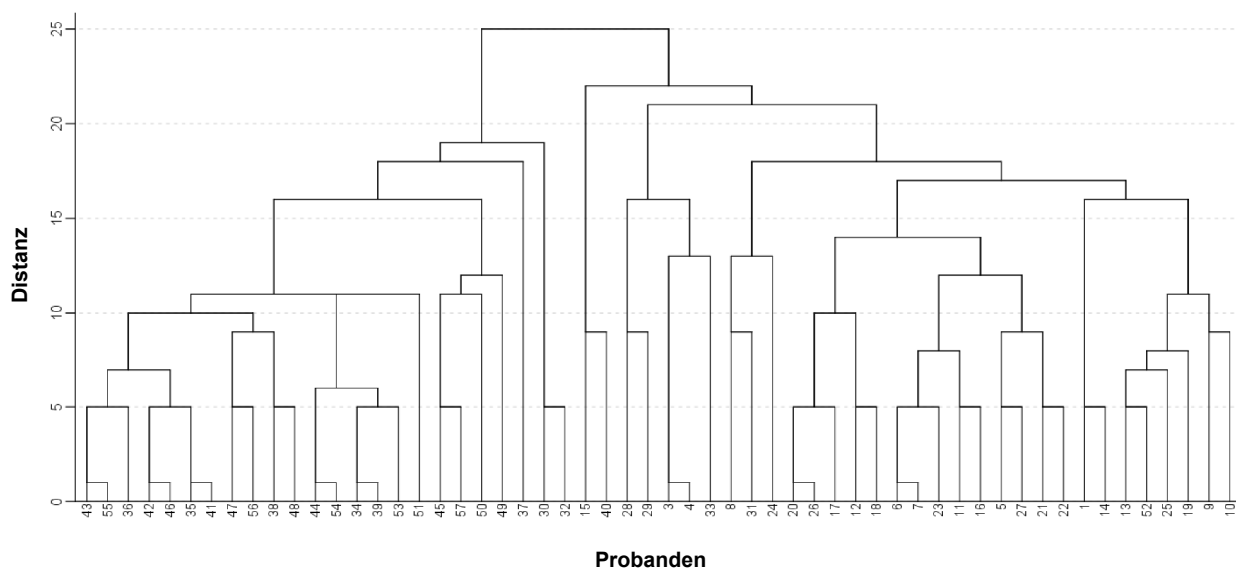


**Tabelle 3.** Punktezuerteilung nach Item und geschätzter Stundenzahl zur Bildung des Summenscores „mentale Aktivität“

| Items                      | Punkte   |
|----------------------------|--|
| <i>Ment1</i>               | 0 = 0–1 Stunden; 1 > 1 Stunden                     |
| <i>Ment2, Ment3, Ment7</i> | 0 = 0 Stunden; 1 > 0 Stunde                        |
| <i>Ment5</i>               | 0 = 0–9 Stunden; 1 = 10–29 Stunden; 2 > 29 Stunden |
| <i>Ment6</i>               | 0 = 0 Stunden; 1 = 1–5 Stunden; 2 > 5 Stunden      |
| <i>Ment8</i>               | 0 = 0 Stunden; 1 = 1–4 Stunden; 2 > 4 Stunden      |
| <i>Ment9</i>               | 0 > 9 Stunden; 1 = 5–9 Stunden; 2 = 0–4 Stunden    |

### Gruppenbildung

Über alle CR-Faktoren wurde anschließend eine hierarchische Clusteranalyse für binäre Daten gerechnet (Linkage zwischen den Gruppen; quadrierte euklidische Distanz als Distanzmaß). Die beiden nicht dichotomen Variablen Beruf und Ausbildung wurden zuvor binär transformiert. Die einzelnen Fusionierungsschritte sind dem Dendrogramm (Abb. 13) zu entnehmen, der neben den Clustermittelwerten der CR-Komponenten (Tab. 4) der Interpretation der Clusterlösung diene.



**Abbildung 13.** Dendrogramm mit durchschnittlicher Verknüpfung zwischen Probanden(-gruppen)

**Tabelle 4.** Clustermittelwerte pro CR-Komponente für die Gering-CR-Gruppe (Cluster 1), die Hoch-CR-Gruppe (Cluster 2) sowie der Mittelwert der Gesamtstichprobe (M)

| Cluster         | Soziale Aktivität | Mentale Aktivität | Bilingualismus | Instrument | Jobkomplexität | Beruf geistig | Beruf körperl. | Schule     | Ausbildung | FH         | Uni        |
|-----------------|-------------------|-------------------|----------------|------------|----------------|---------------|----------------|------------|------------|------------|------------|
| <i>1</i>        | .48               | .39               | .16            | .39        | .32            | .48           | .10            | .35        | .81        | .10        | 0          |
| <i>2</i>        | .48               | .60               | .68            | .60        | .84            | .80           | .04            | 1          | 0          | .12        | .88        |
| <b><i>M</i></b> | <b>.48</b>        | <b>.48</b>        | <b>.39</b>     | <b>.48</b> | <b>.55</b>     | <b>.63</b>    | <b>.07</b>     | <b>.64</b> | <b>.45</b> | <b>.11</b> | <b>.39</b> |

Es ergab sich eine Zwei-Gruppen-Lösung mit einer eindeutigen inhaltlichen Interpretation der Clusterzuordnung entsprechend einer geringen (Cluster 1) vs. hohen (Cluster 2) CR. Die Schulbildung, die oftmals als alleinige Proxy-Variable der CR eingesetzt wird, zeigte hierbei den stärksten Einfluss (vgl. Valenzuela et al., 2011, Cluster 1 = .35, Cluster 2 = 1), während die soziale Aktivität (Cluster 1 = Cluster 2 = .48) nicht zur Gruppeneinteilung beitrug. Das Ward-Verfahren lieferte eine nahezu identische Clusterlösung.

## 5.4 Untersuchungsablauf

Die Datenerhebung erfolgte zwischen Februar und Dezember 2013 (t1) sowie zwischen Februar 2015 und Januar 2016 (t2) bis auf wenige Einzelfälle jeweils wochentags zwischen 9 und 15 Uhr in den Vitalitäts- und psychophysiologischen Laboren der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, Standort Berlin, Arbeitsgruppe „Mentale Gesundheit und kognitive Leistungsfähigkeit“). Nach einer kurzen Unterweisung über den Versuchsablauf und dem Unterzeichnen einer Datenverarbeitungserlaubnis wurde von geschulten BAuA-Mitarbeitern eine ca. 1.5-stündige, standardisiert ablaufende Vitalitätsdiagnostik nach Meißner-Pöthig & Michalak (1997) durchgeführt. Hierbei wurde unter Erhebung von physischen, kognitiven und emotional-sozialen Funktionstests unter Verwendung der vital.expertise professional Software ein individueller Funktionsalterindex errechnet und einer geschlechts- und altersspezifischen Normstichprobe gegenübergestellt. Die verwendeten Funktionsparameter sind dem Anhang D zu entnehmen.

Im Anschluss an die Vitalitätsdiagnostik bearbeiteten die Probanden die Fragebögen zur CR (Anhang C), den ZST mit einem Wechsel in das erste physiologische Labor nach fünf von insgesamt zehn Durchläufen sowie anschließend eine computergestützte Version des Raven-Matrizentests. Nach einer trockenen Demonstration und Unterweisung zur EEG-Ableitung

und Blutdruckmessung unterzeichneten alle Probanden eine Teilnahmeeinwilligungserklärung zum psychophysiologischen Untersuchungsblock (Anhang G). Es folgte ein ca. 40 minütiger Trainingsblock, in dem alle Aufgaben des Hauptexperiments (exkl. AOSPAN) in verkürzter Form, entsprechend der späteren Reihenfolge, trainiert wurden. Der Versuchsleiter kontrollierte die korrekte Ausführung der Tastendrücke, das Instruktionsverständnis sowie den Trainingserfolg. Zum Angleichen des Leistungsniveaus der Probanden wurde ein Genauigkeitswert von jeweils 80 % angestrebt, der durch wiederholtes Üben zu erreichen war. Nach jeder trainierten Aufgabe schätzten die Probanden ihre subjektive Beanspruchung mittels des NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988). Nach einer halbstündigen Mittagspause bei kaltem Büffet und koffeinfreien Getränken folgte eine erneute Blutdruckmessung. Anschließend wurde entsprechend dem vermessenen Schädelumfang eine Elektrodenkappe mittels Kinnband am Kopf des Probanden befestigt und jede Elektrode mithilfe abrasiver Paste und Kochsalzgel präpariert. Während der Elektrodenapplikation füllten die Probanden das Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) aus. Anschließend wurde der Ringfingerumfang vermessen und die Blutdruckmanschette angebracht. Nach der Kontrolle der EEG-Signale und der Impedanzen (in der Regel  $< 5 \text{ k}\Omega$ , in Einzelfällen  $< 10 \text{ k}\Omega$ ) demonstrierte der Versuchsleiter die Auswirkungen muskulärer Artefakte auf das EEG-Signal. Es wurde auf eine entspannte, bequeme Sitzposition hingewiesen und ein Abstand von 70 cm zwischen Augen und Monitor vermessen. Des Weiteren wurden die Probanden über die Videoüberwachung, Fernübertragung des Monitorgeschehens und die Nutzung der Gegensprechanlage zum Kontrollraum unterrichtet.

Nach dem Dimmen des Lichts verließ der Versuchsleiter das Experimentallabor und startete nach einer drei-minütigen Ruhe-EEG-Messung den ersten von insgesamt vier Aufgabenblöcken. Jeder Block beinhaltete 1–3 Aufgaben und dauerte ca. 15–20 Minuten (1. AOSPAN, 2. 0-back, 2-back, Sternberg-(sim.), 3. Sternberg-(sukz.), Stroop, 4. Switch NUM, Switch GER, Switch XXX). Die individuelle Darbietungsfolge der Blöcke war ausbalanciert, die Zuteilung erfolgte anschließend zufällig entsprechend der Reihenfolge der Probandentermine. Die Ausbalancierung zwischen den Blöcken lieferte insgesamt 12 mögliche Kombinationen, da die AOSPAN-Aufgabe aus inhaltlichen Gründen stets als erster bzw. letzter Block zu bearbeiten war. Die Ausbalancierung pro Block ergab jeweils zwei mögliche blockinterne Kombinationen, da die 0-back-Aufgabe stets zu Beginn und die Switch XXX zum Ende eines Blocks bearbeitet werden mussten. Nach jeder Aufgabe schätzten die Probanden ihre subjektive Beanspruchung mittels NASA TLX-Skalen ein. Zwischen dem zweiten und dritten Aufgabenblock machten die Probanden eine ca. 15-minütige Pause.

Den Abschluss des Hauptexperiments bildete eine dreiminütige EEG-Nachruhemessung. Nach dem anschließenden Haarewaschen wurden den Probanden die Ergebnisse der Vitalitätsdiagnostik zurückgemeldet und eine Zuspiegelungserklärung über die kombinierte Verwendung aller Daten (Anhang E) sowie eine Einverständniserklärung für die künftige Kontaktaufnahme (Anhang F) unterschrieben.

### 5.5 Physiologische Registrierung

Die Ableitung des EEG fand in einem elektrisch abgeschirmten und klimatisierten psychophysiologischen Versuchslabor der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, Berlin) statt, das mit einem Videoüberwachungssystem und einer Gegensprechanlage ausgestattet war. Der Proband saß an einem Tisch vor einem 24 Zoll Flachbildschirm und bediente mit dem Zeige- und Mittelfinger beider Hände je eine farbige Taste der beiden jeweils für diesen Zweck angefertigten 2-Tasten-PC-Mäuse (gelb: Mittelfinger links, grün: Zeigefinger links; rot: Zeigefinger rechts; blau: Mittelfinger rechts). Da für den NASA-TLX und die AOSPAN-Aufgabe die Auswahl- und Navigationsfunktion einer Maus erforderlich waren, wurden diese Anforderungen mit einer gängigen USB-Maus bearbeitet. Über eine Remote-Desktop-Anwendung (UltraVNC Viewer) steuerten die Versuchsleiter aus einem separaten Raum den Versuchsablauf und die Datenaufzeichnung. Für die Aufgabenimplementierung und Speicherung von Verhaltensdaten (Reaktionszeiten, Fehlerraten) wurde die E-Prime® Professional 2.0 Software verwendet. Die Ableitung von Blutdruckparametern erfolgte über den Finometer®PRO (FMS, Finapres Medical Systems) und die BeatScope®Easy Software, die in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet werden. Für die Aufzeichnung des EEG wurde die Software BrainVision Recorder 1.10 (Brainproducts) verwendet. Zur Ableitung der hirnelektrischen Aktivität diente eine in den Größen 56, 58 und 60 vorliegende 28-Kanal EasyBrainCap (Brain Products GmbH, Elektroden: Fp1, Fpz, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FC5, FC3, FCz, FC4, FC6, C3, Cz, C4, P7, P3, Pz, P4, P8, O1, Oz, O2, TP9, TP10, IO1, LO1, LO2, Ground: AFz, Referenz: Cz) mit einer Elektrodenplatzierung nach dem internationalen 10-20-System. Die gesinterten Ag/AgCl-Elektroden wurden mittels einer Connectorbox mit einem Flachbandkabel an einen 32-Kanal BrainAmp DC-Verstärker (BrainProducts) angeschlossen. Die Lidschlag- und Augenbewegungsartefakte wurden an den IO1 (vertikales Elektrookulogramm) sowie den LO1 und LO2 Elektroden (horizontales Elektrookulogramm) registriert. Die Ableitung

erfolgte mit einer Abtastrate von 500 Hz mit einer Referenz zur Cz-Elektrode und der AFz als Ground-Elektrode. Die Impedanzen lagen bis auf sehr wenige Ausnahmen unter 5 k $\Omega$ . Für die anschließende Datenverarbeitung wurde BrainVision Analyzer 2.0 (Brainproducts) verwendet. Die statistische Auswertung aller Daten erfolgte mit IBM SPSS Statistics 23.

## **5.6 Datenaufbereitung und -analyse**

### *Behandlung fehlender Werte und Ausreißer*

In die Auswertung der Leistungsdaten gingen zum ersten Untersuchungszeitpunkt 57 Probanden ein (CR1jung = 14 (M = 41.07; SD = 3.2); CR2jung = 15 (M = 39.33; SD = 3.0); CR1alt = 18 (M = 52.44; SD = 5.5); CR2alt = 10 (M = 55.6; SD = 5.5)).

Zum zweiten Untersuchungszeitpunkt lagen Werte von insgesamt 49 Probanden vor (CR1jung = 13 (M = 42.85; SD = 3.2); CR2jung = 15 (M = 41.33; SD = 3.0); CR1alt = 13 (M = 54.69; SD = 5.5); CR2alt = 8 (M = 56.25; SD = 5.4)).

Aus technischen Gründen und dem Vorliegen von Fällen mit einer Farbsehschwäche konnte die Stroop-Aufgabe sowie die 0-back-Aufgabe nicht für alle Probanden durchgeführt werden. Die vereinzelt Extremwerte ( $> 3$  SD vom Mittelwert) aufgrund hoher Fehlerraten und hierdurch nicht verlässlich ermittelbarer Reaktionszeiten wurden nach dem Winsorizing-Prinzip pro Aufgabe, Aufgabenbedingung und Messzeitpunkt durch das 95. Perzentil der jeweiligen Teilstichprobe ersetzt, mussten jedoch von der EEG-Auswertung ausgeschlossen werden. Von der EEG-Auswertung wurden auch einige wenige Probanden aufgrund zu geringer Anzahl artefaktfreier Segmente ausgeschlossen.

Zur Berechnung eines ungewichteten durchschnittlichen Reaktionszeit- sowie des Fehlerindex (falsche Alarme, ausgelassene und fehlerhafte Tastendrucke) über fünf Aufgaben hinweg (excl. 0-back) wurden die fehlenden Werte in der Stroop-Aufgabe (s. o.) jeweils durch eine einfache Imputation mittels Mittelwertersetzung je Aufgabe korrigiert.

Auf die Selektion der mathematisch gering leistungsfähiger Probanden mit einer Rechengenauigkeit  $< 85$  % wurde in der AOSPAN-Aufgabe verzichtet. Es lag zu beiden Zeitpunkten eine signifikant negative Korrelation (jeweils  $p < .05$ ) zwischen der Fehlerrate in den Rechenaufgaben und der Gedächtnisleistung vor, weshalb allgemein nicht von einer Vernachlässigung der Rechenleistung zugunsten besserer Gedächtnisleistung auszugehen ist.

### *Umgang mit Voraussetzungsverletzungen parametrischer Testverfahren*

Vor der Anwendung parametrischer Testverfahren erfolgte aufgrund der kleinen Fallzahlen (<50) die Prüfung auf Normalverteilung mittels des Shapiro-Wilk-Tests. Es ergaben sich für den zweiten Messzeitpunkt für jeweils eine Aufgabenbedingung der 0-back- und Stroop-Aufgabe leichte Abweichungen der Mediane der Reaktionszeiten von der Normalverteilung. Da die Varianzanalyse (ANOVA) gegenüber Verletzungen der Voraussetzungen robust ist und der F-Wert auch für schiefe Verteilungsformen relativ akkurat ist (Games & Lucas, 1966, Salkind, 2017), wurde auf eine Transformation der Daten verzichtet (Field, 2013). Es kam weiterhin vereinzelt vor, dass die Fehlervarianzen entsprechend des Ergebnisses des Levene-Tests als inhomogen zu betrachten waren. Die Box-cox, logarithmische und reziproke Transformationen der Daten erbrachten kein zufriedenstellendes Ergebnis. Da nicht-parametrische Testverfahren jedoch keine mehrfaktoriellen Vergleiche zulassen und keine Interaktionseffekte untersucht werden können, wurde für hoch signifikante Abweichungen von der Annahme der Varianzhomogenität zu Kontrollzwecken der Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen und die Friedman-ANOVA bei verbundenen Stichproben durchgeführt. Diese erbrachten jedoch keine abweichenden Ergebnisse, weshalb stets das Ergebnis der parametrischen Varianzanalyse berichtet wird.

Die P3-Amplituden waren im Gegensatz zu einigen P3-Latenzen bis auf eine Bedingung in der 0-back-Aufgabe zu t1 ( $p = .03$ ) normalverteilt. Weder für die P3-Amplituden noch Latenzen konnten relevante Ausreißer beobachtet werden. Entsprechend den Ausführungen zu den Verhaltensdaten und der Feststellung von Luck (2014, Kap. 10), dass Annahmeverletzungen in nahezu jeder EKP-Studie vorliegen und die Replikation die beste Statistik darstellt, wurde auch hier auf die nicht unkritisch zu beurteilende Datentransformationen verzichtet (Field, 2013).

Bei Verletzungen der Sphärizitätsannahme erfolgte die Korrektur nach Greenhouse-Geisser. Der Adjustierung des Alpha-Fehlers diente die Bonferroni-Korrektur.

### *Aufbereitung elektrophysiologischer Daten*

Das kontinuierlich abgeleitete EEG wurde zunächst hoch- (0.1 Hz) und tiefpassgefiltert (45 Hz). Der anschließenden ICA-basierten Okularkorrektur (Delorme, Sejnowski & Makeig, 2007, Infomax Extended), bei der aus Augenbewegungsartefakten resultierende Independent Components (ICs) eliminiert und die ICA-Lösung zurückprojiziert wurde, ging eine manuelle

Beseitigung grober Artefaktsegmente (Drifts, Muskelartefakte) voraus. Es folgte eine Re-Referenzierung gegen die verbundenen Mastoide (Tp9–Tp10 Elektroden), während Cz als aktive Elektrode in die Datenanalyse aufgenommen wurde. Die EEG-Daten wurden auf den Onset der jeweiligen Targetstimuli epochiert (zwischen –200 ms und 1500–3000 ms), baseline-korrigiert (–200 ms bis 0 ms) und einer automatischen Artefaktkorrektur unterzogen (Eliminierung der Segmente mit Amplitudenschwankungen  $\pm 150 \mu\text{V}$ ). Nach einer selektiven bedingungsabhängigen Epochierung unter Ausschluss inkorrekturer Reaktionen wurden die EEG-Segmente über die jeweilige Aufgabenbedingung (Tab. 6) gemittelt und zur Unterdrückung der Alpha-Aktivität vor der Peakbestimmung mit 10 Hz tiefpassgefiltert. Die P3-Peak-Amplituden wurden jeweils als der durchschnittliche Wert von  $\pm 5$  points (Luck, 2005, S. 123) um die maximal positive lokale Auslenkung in einem zuvor festgelegten Zeitintervall (nach Luck, 2014, S. 285) an der Pz-Elektrode bestimmt. Als P3-Peak-Latenz galt das Zeitfenster zwischen dem Stimulusonset und dem maximal positiven lokalen Peak an der Pz-Elektrode. Die Zeitfenster für die Latenz- und Amplitudenbestimmungen der P3-Komponente wurden entsprechend den Grand-Average-Kurven der Vorversuchsreihe ( $n = 9$ ) festgelegt und im Abgleich mit den individuellen Average-Kurven sowie Grand-Average-Kurven der Hauptversuche zum ersten Untersuchungszeitpunkt leicht angepasst (Tab. 5) und in der Wiederholungsuntersuchung nicht mehr modifiziert.

**Tabelle 5.** Zeitintervalle zur Bestimmung der P3-Komponente nach Aufgabe

| Aufgabe                                    | Intervall (ms) |
|--|----------------|
| <i>Sternberg-(sukz.), Sternberg-(sim.)</i> | 300–700        |
| <i>2-back, Stroop, Switch</i>              | 300–800        |
| <i>0-back</i>                              | 300–600        |

Für die Auswertung des Anterior-Shifts der P3 erfolgte eine Mittelung über jeweils drei frontale (F3, Fz, F4), zentrale (C3, Cz, C4) und parietale (P3, Pz, P4) Elektroden (vgl. Luck, 2009). Die P3-Amplitude wurde in den drei gemittelten Kanälen als der jeweilige mittlere Spannungswert zwischen  $\pm 50$  ms um den automatisch bestimmten lokalen Peak kanalspezifisch im Bereich zwischen 300–700 ms nach Stimulusonset definiert. Anschließend wurden die Daten normalisiert, indem pro Aufgabenbedingung jeder der drei Amplitudenwerte durch die jeweilige Vektorlänge dividiert wurde. Die Vektorlänge ergab

sich jeweils aus der Quadratwurzel der Summe der jeweiligen drei quadrierten Amplitudenwerte (McCarthy and Wood, 1985; Luck, 2014).

### *Statistische Analyse der Verhaltensdaten*

In die Auswertung der Reaktionszeiten gingen nur korrekte Tastendrucke und zur Vermeidung voreiliger Reaktionen nur Werte  $> 200$  ms ein. Als Reaktionszeitmaß diente der Medianwert. Reaktionen außerhalb des aufgabenspezifisch definierten Reaktionsfensters galten als FA. Als ER wurden Reaktionen mit inkorrekten Tasten innerhalb des Reaktionsfensters definiert. Nicht erfolgte Reaktionen galten als OM. Als Alpha-Niveau wurde  $p < .05$  festgelegt. Berichtet werden auch statistische Trends mit  $p < .1$  (= marginal signifikant, Rasch, Frieze, Hofmann & Naumann, 2006, S.12). Der varianzanalytischen Auswertung ging eine Korrelationsanalyse der Kovariablen (Geschlecht, sportliche Aktivität, Zigaretten- und Alkoholkonsum sowie Ein- und Durchschlafstörungen) mit der jeweiligen abhängigen Variable für jede Aufgabenbedingung (Tab. 6) voraus. Die Ergebnisse der Kovarianzanalyse werden nur berichtet, wenn diese von den Ergebnissen der Varianzanalysen abweichen.

**Tabelle 6.** Aufgabenbedingungen (leicht = 1, anspruchsvoll = 2) und die Reaktionsfenster in Abhängigkeit von Aufgabe. ITI = Inter-Target-Intervall, MS = Memory-Set

| <b>Aufgabe</b>           | <b>Einfache<br/>Aufgabenbedingung<br/>(Bedingung 1)</b> | <b>Anspruchsvolle<br/>Aufgabenbedingung<br/>(Bedingung 2)</b> | <b>Reaktions-<br/>fenster (ms)</b> |
|--------------------------|---|---|------------------------------------|
| <i>0-back</i>            | (kurzes ITI)  | (langes ITI)  | 1500                               |
| <i>2-back</i>            | kurzes ITI (2-3 Stimuli)                                | langes ITI (4-6 Stimuli)                                      | 1500                               |
| <i>Sternberg-(sim.)</i>  | kurzes MS (2 Stimuli)                                   | langes MS (6 Stimuli)   | 1300                               |
| <i>Sternberg-(sukz.)</i> | kurzes MS (2-3 Stimuli)                                 | langes MS (4-6 Stimuli)                                       | 1500                               |
| <i>Stroop</i>            | kongruente Trials                                       | inkongruente Trials   | 3000                               |
| <i>Switch</i>            | repeat Trials   | switch Trials   | 3000                               |

Die mixed ANOVA erfolgte sowohl für den Reaktionszeitindex als auch für den Fehlerindex im ersten Schritt jeweils mit dem Innersubjektfaktor Zeit (t1, t2) und den beiden in jeder Analyse konstanten Zwischensubjektfaktoren CR (gering, hoch) und Alter (jung, alt). Aufgrund der Drop-out-Rate von 14 % ( $n = 8$ ) bei der Wiederholungsuntersuchung wurden



zur besseren Interpretation im Anschluss jeweils zwei univariate ANOVAs getrennt für beide Zeitpunkte berechnet.

Für die Fehlerraten schloss sich aufgabenübergreifend separat für die beiden Zeitpunkte eine mixed ANOVA mit der Fehlerart (FA, OM, ER) als Innersubjektfaktor an.

Anschließend folgte sowohl für die Reaktionszeiten wie für die Fehlerraten jeweils eine separate Betrachtung pro Aufgabe und Zeitpunkt. Für die Reaktionszeiten ging als Innersubjektfaktor die jeweils zweistufige Aufgabenbedingung ein (siehe Tab. 6).

Für die Fehlerraten wurde zum einen unabhängig von der Aufgabenbedingung für jede Aufgabe eine mixed ANOVA mit dem dreistufigen Innersubjektfaktor Fehlerart (FA, OM, ER) berechnet. Signifikante Interaktionen mit dem Innersubjektfaktor wurden einer univariaten Varianzanalyse unterzogen. Da FA sich als eine häufige, jedoch nicht immer eindeutig zu einer Aufgabenbedingung zuordenbare Fehlerquelle erwiesen hat, wurde für die Analyse der Fehlerraten in Abhängigkeit von dem Innersubjektfaktor Aufgabenbedingung (siehe Ergebnisdarstellung) nur der Summenwert aus OM und ER einbezogen.

Zur besseren Interpretation der Reaktionszeiten wurde darüber hinaus explorativ die empirische Verteilungsfunktion auf korrekte Reaktionen betrachtet. Dabei wurde der prozentuelle Anteil an allen richtigen Reaktionen pro Proband und Aufgabe errechnet und auf je 50 ms umfassende Zeitfenster (Bins) aufgeteilt. Die Varianzanalyse mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Bin ( $< 25$ , aufgabenabhängige Stufenanzahl) und den beiden Zwischensubjektfaktoren CR und Alter wurde pro Untersuchungszeitpunkt und Aufgabe durchgeführt. Berichtet werden nur relevante CR x Bin-Interaktionseffekte. Die Aufschlüsselung signifikanter Interaktionen erfolgte durch multiple univariate Varianzanalysen pro Bin.

### *Statistische Analyse elektrophysiologischer Daten*

Der varianzanalytischen Auswertung der P3-Amplitude und der P3-Latenz schloss sich jeweils eine Kovarianzanalyse an, wenn die vorausgehende Korrelationsanalyse der Kovariablen (Geschlecht, sportliche Aktivität, Zigaretten- und Alkoholkonsum sowie Ein- und Durchschlafstörungen) auf signifikante Zusammenhänge zur abhängigen Variable in mindestens einer der beiden Aufgabenbedingungen schließen ließ. Analog zu den Verhaltensdaten werden die Ergebnisse der Kovarianzanalyse nur berichtet, wenn von der Varianzanalyse abweichende Effekte vorliegen.

Separat für jede Aufgabe wurden getrennt für die P3-Amplitude und die P3-Latenz an der Pz-Elektrode mixed ANOVAs mit den Innersubjektfaktoren Zeit (t1, t2) und der jeweils zweistufigen Aufgabenbedingung (Tab. 6) sowie den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter gerechnet.

Es schloss sich unter Einschluss der nur zum ersten Zeitpunkt untersuchten Probanden eine separat für beide Untersuchungszeitpunkte durchgeführte mixed ANOVA (Innersubjektfaktor: Aufgabenbedingung, Zwischensubjektfaktoren: CR und Alter) an. Die Aufschlüsselung der Interaktionseffekte erfolgte mit univariaten Varianzanalysen.

Für die Beurteilung der Interaktionseffekte zwischen der CR, dem Alter und der Elektrodenposition wurden pro Aufgabe die normalisierten Spannungswerte der parietalen (P3PzP4), zentralen (C3CzC4) und frontalen (F3FzF4) Elektroden einer ANOVA mit Messwiederholung mit den Innersubjektfaktoren Zeit (t1, t2), Aufgabenbedingung (einfach, anspruchsvoll) und Elektrode (parietal, zentral, frontal) zugeführt. Des Weiteren wurde ein Spannungsgradient im Sinne des Anterior-Shifts der P3 in Anlehnung an Reuter et al. (2016) mittels eines Differenzwertes zwischen den normalisierten parietalen (P3PzP4) und frontalen (F3FzF4) Elektroden ermittelt und für die beiden Zwischensubjektfaktoren CR und Alter über beide Untersuchungszeitpunkte und Aufgabenbedingungen varianzanalytisch untersucht.

## 6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse für die Leistungsdaten (6.1) und anschließend für die elektrophysiologischen Parameter (6.2) dargestellt.

Die Faktorstufen der Inner- und Zwischensubjektfaktoren sind wie folgt definiert und werden soweit nicht inhaltlich erforderlich, zum Zwecke besserer Lesbarkeit nicht gesondert aufgeführt:

**CR** (1 = gering, 2 = hoch), **Alter** (1 = jung, 2 = alt), **Aufgabenbedingung** (1 = einfach vs. 2 = anspruchsvoll; *0-back*-, *2-back-Aufgaben*: kurzes (= 1) vs. langes (= 2) Inter-Target-Intervall (ITI), *Sternberg-(sim. und sukz.)Aufgaben*: kurzes (= 1) vs. langes (= 2) Memory-Set (MS), *Stroop-Aufgabe*: kongruente (= 1) vs. inkongruente (= 2) Trials, *Switch-Aufgabe*: repeat (= 1) vs. switch (= 2) Trials), **Fehlerart** (falsche Alarmer (FA), ausgelassene Reaktionen (OM), fehlerhafte Reaktionen (ER)), **Untersuchungszeitpunkt** (t1 = 2013, t2 = 2015), **Elektrode** (P3PzP4 = parietal, C3CzC4 = zentral, F3FzF4 = frontal)

### 6.1 Leistungsdaten

Die Mediane der Reaktionszeiten sowie der Fehlerraten pro Aufgabe und Untersuchungszeitpunkt aufgeteilt nach CR und Alter der Probanden sind den Anhängen H–K zu entnehmen.

Die Mediane der Reaktionszeiten auf korrekte Tastendrucke sowie Fehlerraten waren sowohl zum ersten wie auch zum zweiten Untersuchungszeitpunkt über alle bearbeiteten Aufgaben (Kontrollbedingung: *0-back*; AG: *Sternberg-(sukz.)*, *Sternberg-(sim.)*; *2-back*; IH: *Stroop*; KF: *Switch-Aufgabe*) durchweg positiv und zumeist signifikant interkorreliert (Anhänge L–M), was die Grundlage für einen gemeinsamen Reaktionszeit- bzw. Fehlerindex bildete (siehe Methode, Abschnitt 5.6).

Es ergaben sich zu beiden Testzeitpunkten negative Korrelationen (jeweils zweiseitig) zwischen der CR und den mittleren Reaktionszeiten (t1:  $r_s = -.25$ ,  $p = .05$ ; t2:  $r_s = -.28$ ,  $p = .05$ ) sowie den durchschnittlichen Fehlerraten (t1:  $r_s = -.32$ ,  $p < .05$ ; t2:  $r_s = -.40$ ,  $p < .01$ ) als auch positive Korrelationen zwischen dem Alter der Probanden und den mittleren Reaktionszeiten (t1:  $r = .31$ ,  $p < .05$ ; t2:  $r = .38$ ,  $p < .01$ ) sowie den Fehlerraten (t1:  $r = .19$ ,  $p = .15$ , n.s.; t2:  $r = .28$ ,  $p < .05$ ). Alter und CR waren nicht signifikant korreliert ( $r_s = -.15$ ,  $p = .26$ , n.s.).

Es bestand zu beiden Untersuchungszeitpunkten kein signifikanter Zusammenhang des Reaktionszeit- oder des Fehlerindex zum Geschlecht der Probanden, der sportlichen Aktivität, dem Zigaretten- und Alkoholkonsum sowie den berichteten Ein- und Durchschlafstörungen (jeweils  $p > .1$ ). Es lag kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Raven-Matrizen-Test mit dem Reaktionszeit- ( $p > .05$ ) bzw. Fehlerindex ( $p > .1$ ) vor. Des Weiteren konnte keine signifikante Assoziation zwischen der Leistung im Raven-Matrizen-Test und der CR ( $r_s = .16$ ,  $p = .23$ , n.s.) bzw. dem Alter ( $r_s = -.18$ ,  $p = .19$ , n.s.) festgestellt werden, während die Raven-Bearbeitungszeit für ältere im Vergleich zu jüngeren Probanden signifikant höher ausfiel ( $r = .28$ ,  $p < .05$ ). Auch die ermittelten drei Parameter aus den 10 Durchgängen des ZST (der minimale Wert, der maximale Wert und die Differenz Max–Min) standen weder zum Reaktionszeit- bzw. Fehlerindex noch zur CR oder dem Alter der Probanden in einem korrelativen Zusammenhang (jeweils  $p > .1$ ).

Im Folgenden werden Ergebnisse der Varianzanalysen für die Leistungsdaten (Reaktionszeiten, Fehlerraten) in Abhängigkeit von CR, Alter, Aufgabenbedingung, Fehlerart und Untersuchungszeitpunkt vorgestellt. Dabei wird jeweils hypothesengeleitet vorgegangen, in dem die Ergebnisdarstellung abschnittsweise entsprechend den Hypothesen untergliedert wird.

- (1a)** *In Aufgaben zum Arbeitsgedächtnis (AG), der kognitiven Flexibilität (KF) und der Inhibitionskontrolle (IH) sind für Probanden mit einer hohen kognitiven Reserve kürzere Reaktionszeiten und geringere Fehlerraten zu erwarten.*

#### *Reaktionszeitmediane*

Die ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren Alter und CR ergab für den aufgabenübergreifenden Reaktionszeitindex einen signifikanten Haupteffekt des Zwischensubjektfaktors CR ( $F(1,44) = 4.84$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .1$ ) mit durchschnittlich kürzeren Reaktionszeiten bei Probanden mit einer hohen CR ( $CR1 = 780.42$  ms,  $CR2 = 728.72$  ms). Kein Interaktionseffekt mit CR war statistisch signifikant.

Die separaten mixed ANOVAs pro Aufgabe und Untersuchungszeitpunkt (Innersubjektfaktor: Bedingung, Zwischensubjektfaktoren: CR und Alter) erbrachten für zwei von sechs Aufgaben, die *2-back-* (AG) und *Switch-Aufgabe* (KF) einen Haupteffekt der CR mit kürzeren Reaktionszeiten für Hoch-CR-Probanden. Für die *0-back-*, *Sternberg-(sim.)-*, *Sternberg-*

(sukz.)- und die *Stroop-Aufgabe* zeigte sich bei hoher CR trotz numerisch ebenfalls kürzerer durchschnittlicher Reaktionszeiten kein signifikanter Einfluss auf die Reaktionszeitmediane (Tab. 7).

In den beiden Aufgaben mit statistisch relevantem Einfluss der CR ließ sich sowohl in der *2-back*- wie auch in der *Switch-Aufgabe* zu t1 ein marginal signifikanter Haupteffekt der CR beobachten (*2-back*:  $F(1,53) = 3.32$ ,  $p = .07$ ,  $\eta^2 = .06$ , n.s.); *Switch*:  $F(1,53) = 2.94$ ,  $p = .09$ ,  $\eta^2 = .05$ , n.s.), der zum zweiten Untersuchungszeitpunkt jeweils signifikant war (*2-back*:  $F(3,45) = 6.84$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .13$ ; *Switch*:  $F(1,45) = 5.05$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .1$ ). Die Tabelle 7 gibt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeitmediane pro Aufgabe und Untersuchungszeitpunkt wieder.

**Tabelle 7.** Durchschnittliche Reaktionszeitmediane (M) sowie Standardabweichungen (SD) in Abhängigkeit von der kognitiven Reserve (CR1 = gering, CR2 = hoch), Aufgabe und dem Untersuchungszeitpunkt (t1 = 2013, t2 = 2015)

| Aufgabe                       | Zeit | M (SD)                  |                        | N     | p              |
|-------------------------------|------|-------------------------|------------------------|-------|----------------|
|                               |      | CR1                     | CR2                    |       |                |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 347.27 (41.36)          | 339.54 (39.30)         | 32/24 | n.s.           |
|                               | t2   | 346.83 (44.95)          | 340.33 (43.40)         | 26/23 | n.s.           |
| <i>2-back</i>                 | t1   | <b>542.06 (114.06)</b>  | <b>482.70 (95.97)</b>  | 32/25 | <b>.07</b>     |
|                               | t2   | <b>512.90 (89.30)</b>   | <b>442.17 (102.23)</b> | 26/23 | <b>.01</b>     |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 811.20 (163.16)         | 782.60 (116.37)        | 32/25 | n.s.           |
|                               | t2   | 768.37 (157.71)         | 769.83 (109.81)        | 26/23 | n.s.           |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 919.73 (128.55)         | 900.30 (95.40)         | 32/25 | n.s.           |
|                               | t2   | 898.08 (139.10)         | 863.09 (92.22)         | 25/23 | n.s.           |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 1104.37 (204.26)        | 1044.69 (177.03)       | 31/24 | n.s.           |
|                               | t2   | 1070.92 (215.66)        | 964.39 (142.98)        | 26/23 | n.s.           |
| <i>Switch</i>                 | t1   | <b>1002.56 (152.22)</b> | <b>920.60 (158.26)</b> | 32/25 | <b>.09</b>     |
|                               | t2   | <b>979.79 (159.59)</b>  | <b>865.78 (144.51)</b> | 26/23 | <b>&lt;.05</b> |

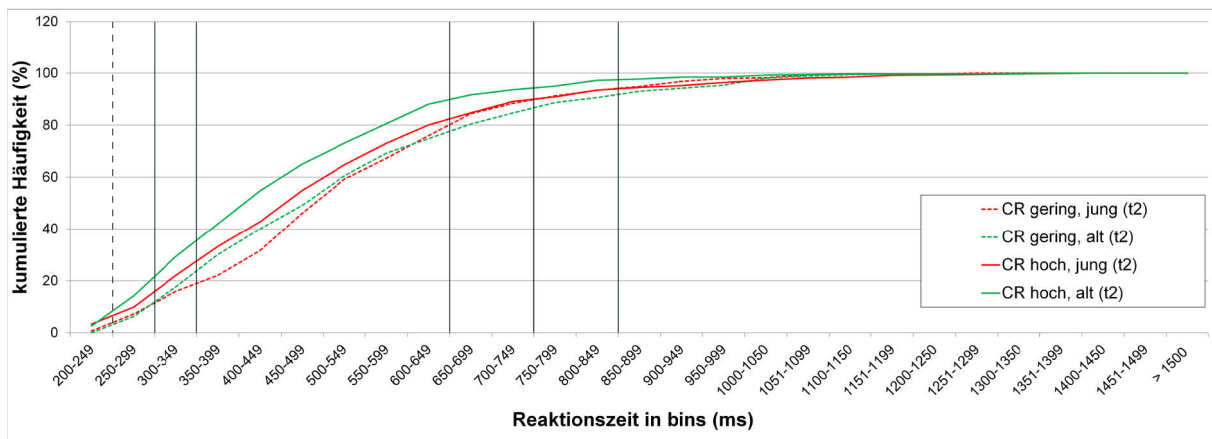
Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ .

### Reaktionszeit-Bins

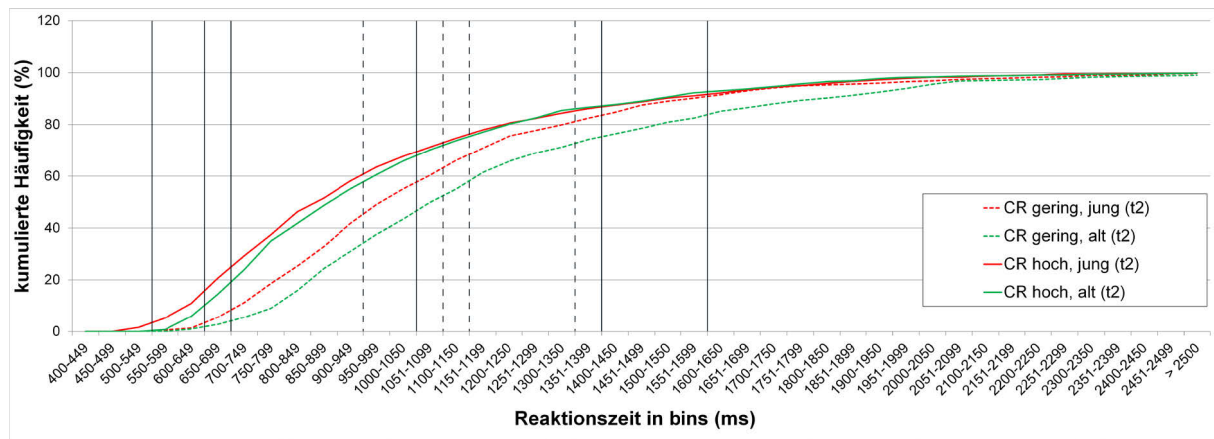
Der individuelle prozentuelle Anteil an richtigen Reaktionen wurde pro Aufgabe auf Reaktionszeit-Bins von je 50 ms aufgeteilt und in einer ANOVA mit Messwiederholung (Zwischensubjektfaktoren CR und Alter) untersucht. Es zeigten sich zu t2 erneut in der *2-back-* ( $F(15,675) = 3.28$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .07$ , Abb. 14) und der *Switch-Aufgabe* ( $F(24,1080) = 3.28$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .07$ , Abb. 15) CR x Bin-Interaktionen. Signifikante Interaktionseffekte sind jeweils durch vertikale Linien ( $p < .05$ ), marginal signifikante Effekte durch gestrichelte Linien ( $p < .1$ ) markiert.

In der *2-back-Aufgabe* erreichten Probanden mit einer hohen im Vergleich zur geringen CR in sechs Zeitabschnitten einen signifikant höheren Anteil schnellerer Reaktionen. Die Gruppenunterschiede sind insbesondere bei sehr kurzen und langsamen Reaktionszeit-Bins ersichtlich, während bei mittlerer Reaktionsgeschwindigkeit die Gruppenunterschiede schwinden.



**Abbildung 14.** Die kumulierte Häufigkeit der aggregierten Reaktionszeiten in der 2-back-Aufgabe zum ersten Untersuchungszeitpunkt über vier Probandengruppen in Abhängigkeit von Alter und CR in Prozent. Durchgezogene Linie  $p < .05$ , gestrichelte Linie  $p < .1$

Auch in der *Switch-Aufgabe* ließen sich signifikante Bins eher am unteren und am oberen Ende der Verteilung beobachten, wobei über das gesamte Reaktionszeitfenster Probanden mit einer hohen CR unabhängig vom Alter einen höheren Anteil an schnelleren Reaktionen vorweisen konnten als Probanden mit einer geringen CR.



**Abbildung 15.** Die kumulierte Häufigkeit der aggregierten Reaktionszeiten in der Switch-Aufgabe zum ersten Untersuchungszeitpunkt über vier Probandengruppen in Abhängigkeit von Alter und CR in Prozent. Durchgezogene Linie  $p < .05$ , gestrichelte Linie  $p < .1$

## AOSPAN

Die zeitpunktabhängigen multivariaten ANOVAs ergaben zu t1 für jeden Innersubjektfaktor (AOSPAN-Absolut-Score (Anzahl korrekter Buchstabensets), AOSPAN-Partial-Score (Anzahl korrekter Buchstaben) sowie Rechenfehler) signifikant bessere Leistungsscores für die Hoch-CR-Gruppe (Tab. 8). Ebenso zu t2 war die AG-Kapazität für Probanden mit einer hohen CR signifikant besser als bei einer geringen CR. Zu t2 unterschieden sich die CR-Gruppen jedoch nicht mehr in der Anzahl der Rechenfehler.

**Tabelle 8.** AOSPAN-Absolut-Score (Anzahl korrekter Buchstabensets), AOSPAN-Partial-Score (Anzahl korrekter Buchstaben) und Rechenfehler in Abhängigkeit von kognitiver Reserve (CR = gering, CR2 = hoch) und Untersuchungszeitpunkt (t1 = 2013, t2 = 2015)

| Innersubjektfaktor              | Zeit | CR1                  | CR2                  | $F(df1,df2)$                        | $p$                           | $\eta p^2$ |
|---------------------------------|------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------|
| Anzahl korrekter Buchstabensets | t1   | <b>20.90 (11.79)</b> | <b>35.44 (17.76)</b> | <b><math>F(1,54) = 13.50</math></b> | <b><math>&lt; .001</math></b> | <b>.20</b> |
|                                 | t2   | <b>22.65 (16.01)</b> | <b>37.48 (15.15)</b> | <b><math>F(1,45) = 11.35</math></b> | <b><math>&lt; .01</math></b>  | <b>.20</b> |
| Anzahl korrekter Buchstaben     | t1   | <b>42.61 (14.76)</b> | <b>53.32 (14.52)</b> | <b><math>F(1,54) = 7.41</math></b>  | <b><math>&lt; .01</math></b>  | <b>.12</b> |
|                                 | t2   | <b>44.12 (15.97)</b> | <b>56.04 (11.62)</b> | <b><math>F(1,45) = 9.10</math></b>  | <b><math>&lt; .01</math></b>  | <b>.17</b> |
| Rechenfehler                    | t1   | <b>8.26 (5.13)</b>   | <b>5.56 (3.01)</b>   | <b><math>F(1,54) = 5.39</math></b>  | <b><math>&lt; .05</math></b>  | <b>.09</b> |
|                                 | t2   | 8.58 (6.59)          | 6.35 (4.12)          | $F(1,45) = 1.77$                    | .19                           | n.s.       |

Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ .

### *Fehlerraten*

Die ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren Alter und CR ergab für den aufgabenübergreifenden Fehlerindex (FA, OM, ER) einen Haupteffekt des Faktors CR mit deutlich geringeren Fehlerraten für Probanden mit einer hohen im Vergleich zu solchen mit einer geringen CR ( $F(1,45) = 9.82$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .18$ ,  $CR1 = 16.5$ ,  $CR2 = 9.6$ ).

Die varianzanalytische Auswertung der Fehlerraten pro Aufgabe und Zeitpunkt unter Einbezug zum zweiten Zeitpunkt ausgeschiedener Probanden (Innersubjektfaktor Fehlerart, Zwischensubjektfaktoren Alter und CR) erbrachte für vier der sechs untersuchten Aufgaben (AG: *2-back*, *Sternberg-(sukz.)*, *Sternberg-(sim.)*; KF: *Switch*) geringere Fehlerraten für die Hoch-CR-Probanden (Tab. 9). In der *0-back*- und *Stroop-Aufgabe* hatte die CR keinen Einfluss auf die Fehlerhäufigkeit.

Dabei konnten in der *2-back-Aufgabe* nur FA und OM ausgewertet werden, da zu beiden Testzeitpunkten keine fehlerhaften Tastendrucke auf Targetreize erfolgten. Der Faktor CR zeigte zu t1 einen statistischen Trend ( $F(1,53) = 2.78$ ,  $p = .1$ ,  $\eta^2 = .05$ ), der zum zweiten Untersuchungszeitpunkt signifikant war ( $F(1,45) = 5.78$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .11$ ) und auf höhere Fehlerraten bei einer geringen CR hinwies.

Auch in der *Sternberg-(sim.)-Aufgabe* zeigte sich zum ersten Untersuchungszeitpunkt ein marginal signifikanter ( $F(1,53) = 2.70$ ,  $p = .1$ ,  $\eta^2 = .05$ , n.s.) und zu t2 ein signifikanter Haupteffekt des Faktors CR ( $F(1,45) = 5.3$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .11$ ) mit insgesamt geringeren Fehlerraten für Probanden mit einer hohen CR.

In der *Sternberg-(sukz.)* und der *Switch-Aufgabe* ergaben sich für Probanden mit einer hohen CR sowohl zum ersten (*Sternberg-(sukz.)*:  $F(1,53) = 5.4$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .1$ ; *Switch*:  $F(1,53) = 5.37$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ ) wie auch zum zweiten Untersuchungszeitpunkt (*Sternberg-(sukz.)*:  $F(1,45) = 7.55$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .14$ ; *Switch*:  $F(1,45) = 5.62$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .11$ ) signifikant weniger Fehler im Vergleich zu Probanden mit einer geringen CR.

In den beiden letzteren Aufgaben lag zudem eine CR x Fehlerart-Interaktion vor (*Sternberg-(sukz.)*:  $F_{t1}(2,53) = 4.25$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .07$ ;  $F_{t2}(2,45) = 6.54$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .13$ ; *Switch*:  $F_{t1}(2,53) = 5.40$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ ;  $F_{t2}(2,45) = 3.44$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .07$ , n.s.) mit vergleichbarer Anzahl an ausgelassenen Reaktionen zwischen den beiden CR-Gruppen, jedoch einer jeweils höheren Rate an fehlerhaften Tastendrucke in der Gruppe mit geringer CR (*Sternberg-(sukz.)*:  $F_{t1}(1,53) = 3.46$ ,  $p = .07$ ,  $\eta^2 = .06$ , n.s.; 11.5 vs. 8;  $F_{t2}(1,45) = 9.69$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .18$ ; 12.3 vs. 5.9; *Switch*:  $F_{t1}(1,53) = 7.10$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .12$ ; 15.7 vs. 7.4;



$F_{2(1,45)} = 4.53$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ ; 10.4 vs. 5.9) sowie einer signifikant größeren Häufigkeit falscher Alarmer in der *Sternberg-(sukz.)Aufgabe* bei geringer CR zu beiden Messzeitpunkten ( $F_{t1(1,53)} = 5.50$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ ; 23.5 vs. 15.2;  $F_{2(1,45)} = 6.58$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .13$ ; 22.8 vs. 12.6).

**Tabelle 9.** Durchschnittliche Fehlerraten (falsche Alarmer, ausgelassene und fehlerhafte Tastendrucke) sowie Standardabweichungen (SD) in Abhängigkeit von der kognitiven Reserve (CR1 = gering, CR2 = hoch), der Aufgabe und dem Untersuchungszeitpunkt (t1 = 2013, t2 = 2015)

| Aufgabe               | Zeit | M (SD)               |                      | N<br>CR1/CR2 | p              |
|-----------------------|------|----------------------|----------------------|--------------|----------------|
|                       |      | CR1                  | CR2                  |              |                |
| 0-back                | t1   | 2.15 (3.06)          | 2.54 (3.10)          | 32/24        | n.s.           |
|                       | t2   | 2.33 (3.44)          | 2.97 (3.00)          | 26/23        | n.s.           |
| 2-back                | t1   | <b>27.50 (23.21)</b> | <b>17.40 (16.65)</b> | <b>32/25</b> | <b>.10</b>     |
|                       | t2   | <b>24.33 (21.92)</b> | <b>11.74 (14.39)</b> | <b>26/23</b> | <b>&lt;.05</b> |
| Sternberg-<br>(sukz.) | t1   | <b>46.63 (28.80)</b> | <b>30.80 (16.99)</b> | <b>32/25</b> | <b>&lt;.05</b> |
|                       | t2   | <b>46.06 (33.93)</b> | <b>25.11 (16.64)</b> | <b>26/23</b> | <b>&lt;.05</b> |
| Sternberg-<br>(sim.)  | t1   | <b>31.41 (20.78)</b> | <b>22.05 (20.08)</b> | <b>32/25</b> | <b>.10</b>     |
|                       | t2   | <b>27.53 (20.70)</b> | <b>16.38 (10.06)</b> | <b>26/23</b> | <b>&lt;.05</b> |
| Stroop                | t1   | 4.45 (5.95)          | 3.35 (3.51)          | 31/24        | n.s.           |
|                       | t2   | 2.25 (2.50)          | 2.86 (3.58)          | 26/23        | n.s.           |
| Switch                | t1   | <b>15.96 (14.90)</b> | <b>9.82 (12.25)</b>  | <b>32/25</b> | <b>&lt;.01</b> |
|                       | t2   | <b>9.70 (8.29)</b>   | <b>5.45 (4.20)</b>   | <b>26/23</b> | <b>&lt;.05</b> |

Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ .

## Zwischenfazit

Die Annahme, dass Probanden mit einer hohen kognitiven Reserve in Aufgaben zu exekutiven Funktionen kürzere Reaktionszeiten und geringere Fehlerraten aufweisen, kann insgesamt als bestätigt angesehen werden. Probanden mit einer hohen CR hatten aufgabenübergreifend (Reaktionszeitindex, Fehlerindex) signifikant kürzere Reaktionszeiten als auch geringere Fehlerraten und eine signifikant größere AG-Kapazitätspanne im Vergleich zu Probanden mit einer geringen CR. Deskriptiv zeigten sich bis auf eine Aufgabe mit

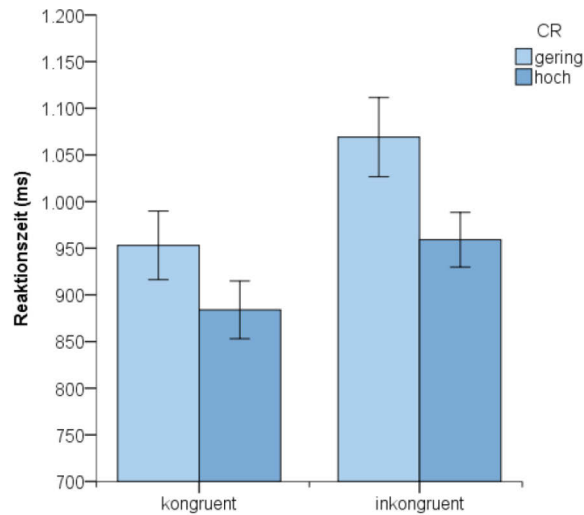
vergleichbaren Reaktionszeitmedianen (AG: *Sternberg-(sukz.)*) bei einer hohen CR durchgehend kürzere Reaktionszeiten. In zwei Aufgaben (AG: *2-back*, KF: *Switch*) war dieser numerische Unterschied zum ersten Zeitpunkt marginal signifikant, zum zweiten Zeitpunkt jeweils signifikant. Es ließ sich zudem beobachten, dass Probanden mit einer hohen CR im Vergleich zur geringen CR in einigen Aufgaben vor allem einen höheren Anteil an sehr schnellen und einen kleineren Anteil an sehr langsamen Reaktionen aufwiesen. In den Fehlerraten zeichnete sich der leistungsfördernde Effekt der CR noch stärker ab als in der Reaktionsgeschwindigkeit. Bis auf zwei Aufgaben mit einer jeweils sehr geringen Fehlerrate (*0-back*, IH: *Stroop*) zeigten alle restlichen Aufgaben signifikant weniger Fehler im Falle einer hohen CR. Auch hier war in zwei Fällen (AG: *2-back*, *Sternberg-(sim.)*) dieser Effekt zum zweiten Untersuchungszeitpunkt stärker ausgeprägt. Es zeigten sich Hinweise darauf, dass es keinen Unterschied zwischen den CR-Gruppen in der Anzahl ausgelassener Reaktionen gibt. Bei einer geringen CR ist jedoch die Wahrscheinlichkeit falscher Reaktionen und Fehlreaktionen in Form falscher Alarme erhöht. Der geringste Leistungsvorteil einer hohen CR zeigte sich für die Inhibitionskontrollleistung (*Stroop*).

**(1b)** *In anspruchsvollen Aufgabenbedingungen ist der Leistungsunterschied (Reaktionszeiten, Fehlerraten) zwischen Probanden mit einer hohen und geringen kognitiven Reserve größer als in den einfachen Aufgabenbedingungen.*

### *Reaktionszeit*

Die ANOVAs pro jeweilige Aufgabe mit dem Innersubjektfaktor Aufgabenbedingung und den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter ergaben zu beiden Testzeitpunkten jeweils signifikante Haupteffekte der Aufgabenbedingung ( $p < .001$ , Ausnahme: *2-back-Aufgabe* mit  $p < .05$  zu t1) mit längeren Reaktionszeiten in den folgenden Aufgabenbedingungen: *0-back*, *2-back*: kurzes ITI; *Sternberg-(sim.)*: langes MS und *Sternberg-(sukz.)*: kurzes MS; *Stroop*: inkongruente Trials; *Switch*: switch Trials.

Eine signifikante Bedingung x CR-Interaktion lag nur in der *Stroop-Aufgabe* (IH) zu t2 ( $F(1,45) = 5.19$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .1$ ) mit langsameren Reaktionen auf inkongruente Trials bei Probanden mit einer geringen im Vergleich zur hohen CR vor (kongruent: CR1 = 953 ms, CR2 = 898 ms,  $p = .16$ , n.s., inkongruent: CR1 = 1069 ms, CR2 = 976 ms,  $p < .04$ , Abb. 16).



**Abbildung 16.** Mittlere Reaktionszeitmediane und Standardfehler in der Stroop-Aufgabe in Abhängigkeit von Aufgabenbedingung (kongruent, inkongruent) und CR (gering, hoch) zum zweiten Untersuchungszeitpunkt

### Fehlerraten

Da für die falschen Alarme nicht immer eine eindeutige Zuordnung zu einer der beiden Aufgabenbedingungen möglich war, ging, soweit nicht explizit erwähnt, in die ANOVA mit dem Innersubjektfaktor Aufgabenbedingung nur der Summenwert aus ausgelassenen und fehlerhaften Antworten ein.

Die ANOVAs pro Aufgabe und Untersuchungszeitpunkt mit dem Innersubjektfaktor Aufgabenbedingung und den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter ergaben bis auf die *0-back-Aufgabe* durchweg signifikante Haupteffekte der Aufgabenbedingung ( $p < .01$ ) mit jeweils höheren Fehlerraten für folgende Aufgabenbedingungen: *2-back*: langes ITI; *Sternberg-(sim. und sukz.)*: langes MS; *Stroop*: kongruente Trials zu t2 bei jedoch sehr geringen Fehlerraten (Fehleranzahl: kon. = 2.6 vs. inkon. = 1.8); *Switch*: switch Trials.

Für die drei AG-Aufgaben (*2-back*, *Sternberg-(sim. und sukz.)*) ergab sich eine Bedingung x CR-Interaktion mit höheren Fehlerraten für Probanden mit geringer CR in den jeweils anspruchsvolleren Aufgabenbedingungen:

In der *Sternberg-(sim.)Aufgabe* zeigten sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten ( $F_{t1}(1,53) = 5.40$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ ;  $F_{t2}(1,44) = 8.40$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .16$ ) und für die *Sternberg-(sukz.)Aufgabe* zu t2 ( $F(1,45) = 10.29$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .19$ ) signifikant geringere Fehlerraten für Probanden mit einer hohen CR in den langen MS (*Sternberg-(sim.)*:

t1: CR1 = 11.9 vs. CR2 = 7.1; t2: CR1 = 10.5 vs. CR2 = 6.3,  $p < .05$ ; *Sternberg-(sukz.)*: CR1 = 10.7 vs. CR2 = 5.0,  $p < .01$ ).

In der *2-back-Aufgabe* ließ sich zu t2 eine marginal signifikante CR x Bedingung-Interaktion ( $F(1,45) = 3.11$ ,  $p = .08$ ,  $\eta^2 = .07$ , n.s.) mit höheren Fehlerraten bei einer geringen CR in der Bedingung mit langen ITI verzeichnen (CR1 = 4.3, CR2 = 1.9,  $p < .05$ ).

### Zwischenfazit

Die Hypothese, dass Probanden insbesondere bei anspruchsvollen Aufgaben von einer hohen CR profitieren, kann im Ansatz bestätigt werden. Hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit wirkte sich zwar gemäß Hypothese 1a eine hohe CR zumeist sowohl auf einfache als auch anspruchsvolle Aufgabenbedingungen gleichermaßen positiv aus, dennoch konnte ein signifikanter bedingungsabhängiger Leistungsvorteil für die Inhibitionskontrollleistung (*Stroop-Aufgabe*) bestätigt werden. Insbesondere in der anspruchsvollen Bedingung mit inkongruenten Trials reagierten Probanden mit einer hohen CR signifikant schneller als solche mit einer geringen CR. Eine breitere Bestätigung der Hypothese fand sich für die Fehlerrate. In allen drei AG-Aufgaben (*2-back*, *Sternberg-(sim. und sukz.)*) hatten Probanden mit einer hohen CR weniger Fehler in den jeweils fehlerträchtigen Aufgabenbedingungen als solche mit einer geringen CR. Die Effekte der CR in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen waren somit sowohl in der Inhibitionskontrollleistung in der Reaktionsgeschwindigkeit als auch in der AG-Leistung in den Fehlerraten vor allem zum zweiten Untersuchungszeitpunkt offensichtlich.

- (1c) *Die kognitive Reserve beeinflusst die Leistung (Reaktionszeiten, Fehlerraten) in der älteren Probandengruppe stärker als in der jüngeren Probandengruppe.*

### Reaktionszeiten

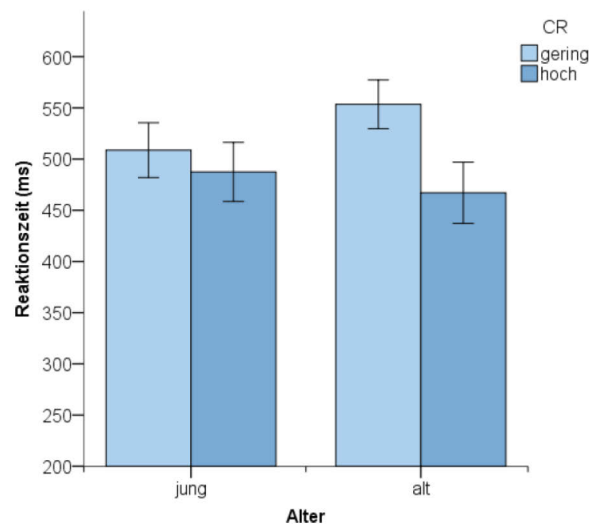
Die Analyse des aufgabenübergreifenden Reaktionszeitindex in einer ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren Alter und CR ergab einen signifikanten Haupteffekt des Alters ( $F(1,44) = 4.23$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ ) mit kürzeren Reaktionszeiten für jüngere im Vergleich zu älteren Probanden (jung = 730.46 ms, alt = 778.69 ms). Es lag kein Interaktionseffekt mit der CR vor. Auch die univariaten ANOVAs des Reaktionszeitindex zum ersten sowie zum zweiten Untersuchungszeitpunkt ergaben jeweils einen signifikanten Haupteffekt des Alters

( $F_{t1}(3,53) = 4.93$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ , jung = 744.24 ms, alt = 790.46 ms;  $F_{t2}(3,44) = 4.32$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ , jung = 714.12 ms, alt = 765.95 ms), es fehlte jedoch eine Wechselwirkung mit der CR.

Auf der Aufgabenebene lag in den mixed ANOVAs mit dem Innersubjektfaktor Aufgabenbedingung und den Zwischensubjektfaktoren Alter und CR ein Haupteffekt des Alters in zwei von sechs Aufgaben vor: der *Stroop-Aufgabe* ( $F_{t1}(1,51) = 10.57$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .17$ , jung = 942 ms, alt = 1087 ms;  $F_{t2}(1,45) = 12.38$ ,  $p = .001$ ,  $\eta^2 = .22$ , jung = 894 ms, alt = 1054 ms) und der *Sternberg-(sim.)Aufgabe* ( $F_{t1}(1,53) = 5.40$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ , jung = 916 ms; alt = 978 ms;  $F_{t2}(1,44) = 4.45$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ , jung = 887 ms; alt = 949 ms). In der *Sternberg-(sim.)Aufgabe* war zudem eine Bedingung x Alter-Interaktion ( $F_{t1}(1,53) = 3.70$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .07$ , jung = 974 ms, alt = 1060 ms;  $F_{t2}(1,44) = 8.89$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .17$ , jung = 943 ms, alt = 1037 ms) mit längeren Reaktionszeiten in der älteren Probandengruppe auf lange MS festzustellen.

In keiner der sechs Aufgaben war bei der Analyse der Reaktionszeiten eine signifikante CR x Alter-Interaktion zu beobachten.

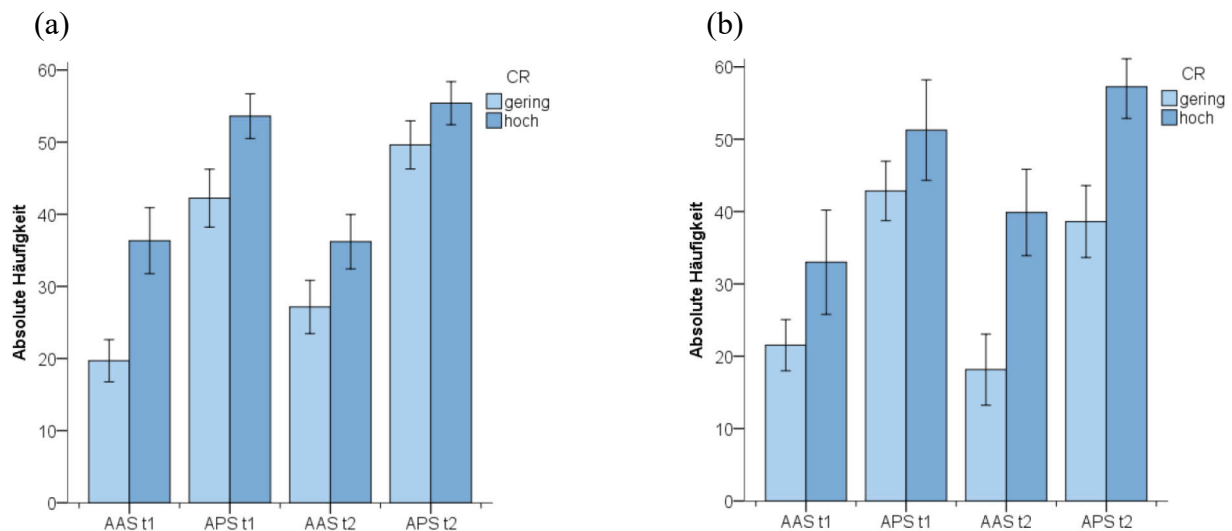
Lediglich zu t1 deutete sich für die *2-back-Aufgabe* eine Tendenz ( $F(3,53) = 3.30$ ,  $p = .07$ ,  $\eta^2 = .06$ ) zu kürzeren Reaktionszeiten älterer Probanden mit hoher CR in der anspruchsvolleren Bedingung mit langen ITI an (CR1 = 553 ms, CR2 = 467 ms,  $p < .05$ , Abb.17).



**Abbildung 17.** Mittlere Reaktionszeitmediane und Standardfehler in der 2-back-Aufgabe bei langen Inter-Target-Intervallen in Abhängigkeit von CR (gering, hoch) und Alter (jung, alt) zum ersten Untersuchungszeitpunkt

## AOSPAN

Die mixed ANOVAs mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter über den AOSPAN-Absolut-Score (AAS, Anzahl korrekter Buchstabensets), AOSPAN-Partial-Score (APS, Anzahl korrekter Buchstaben) sowie die Rechenfehler ergaben für die Rechenfehler keine Interaktionseffekte mit der CR oder dem Alter, während sich für beide Parameter zur Messung der AG-Kapazitätsspanne eine signifikante Zeit x CR x Alter-Interaktion ergab (AAS:  $F(1,45) = 6.60$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .13$ ; APS:  $F(1,45) = 6.70$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .13$ ). Jüngere Hoch-CR-Probanden zeigten deskriptiv keine zeitpunktabhängigen Unterschiede in der AG-Kapazität (AAS:  $t1 = 36.3$ ,  $t2 = 36.2$ ; APS:  $t1 = 53.6$ ,  $t2 = 55.4$ ), während jüngere Gering-CR-Probanden zum zweiten Untersuchungszeitpunkt die Leistung numerisch steigern konnten (AAS:  $t1 = 19.7$ ,  $t2 = 27.2$ ; APS:  $t1 = 42.2$ ,  $t2 = 49.6$ , Abb. 18a). Der Interaktionseffekt zwischen Zeit und CR war innerhalb der jüngeren Probandengruppe nicht signifikant (AAS, APS:  $p = .11$ , n.s.). Gering-CR-Ältere verbesserten sich hingegen nicht (AAS:  $t1 = 21.5$ ,  $t2 = 18.2$ ; APS:  $t1 = 42.8$ ,  $t2 = 38.6$ , Abb. 18b), während Hoch-CR-Ältere eine Leistungsverbesserung erzielten (AAS:  $t1 = 33$ ,  $t2 = 39.8$ ; APS:  $t1 = 51.3$ ,  $t2 = 57.3$ ). Der Zeit x CR-Interaktionseffekt innerhalb der älteren Probandengruppe war marginal signifikant (AAS:  $F(1,19) = 4.20$ ,  $p = .05$ ,  $\eta^2 = .18$ , APS:  $F(1,19) = 3.60$ ,  $p = .07$ ,  $\eta^2 = .16$ ).



**Abbildung 18 a, b.** Absolute Häufigkeiten und Standardfehler korrekt erinnelter Buchstabensets (AAS, AOSPAN-Absolut-Score) sowie korrekt erinnelter Buchstaben an richtiger Position (APS, AOSPAN-Partial-Score) in Abhängigkeit von Untersuchungszeitpunkt ( $t1 = 2013$ ,  $t2 = 2015$ ) in der jüngeren (a) und älteren (b) Probandengruppe

Die CR x Alter-Interaktion war bei der zeitpunktunabhängigen varianzanalytischen Betrachtung jeweils nicht signifikant.

### *Fehlerraten*

Für den aufgabenübergreifenden *Fehlerindex* (FA, OM, ER) ergab die ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren Alter und CR bei fehlendem Haupteffekt des Alters einen marginal signifikanten Alter x CR-Interaktionseffekt ( $F(1,45) = 3.67, p = .06, \eta^2 = .08$ ) mit einer beobachteten Schärfe von 47 %. Während es keinen statistischen Unterschied zwischen den beiden jüngeren Probandengruppen ( $p = .27, n.s., CR1 = 13.3, CR2 = 10.6$ ) gab, unterschieden sich die älteren Gruppen in einer univariaten ANOVA in Abhängigkeit von der CR signifikant in der Gesamtfehlerrate voneinander ( $F(1,19) = 7.70, p < .05, \eta^2 = .05, CR1 = 19.6, CR2 = 8.6$ ).

Auf der Aufgabenebene ergab sich ein signifikanter Haupteffekt des Zwischensubjektfaktors Alter ( $F(1,53) = 6.01, p < .05, \eta^2 = .1$ ) nur zu t1 in der *2-back-Aufgabe* mit einer signifikant höheren Fehlerrate in der älteren Probandengruppe (3.1 vs. 5.8), während in insgesamt vier von sechs Aufgaben ein Interaktionseffekt zwischen CR und Alter vorlag (*0-back-, 2-back-, Sternberg-(sukz.) und Switch-Aufgabe*), der mit Ausnahme der *0-back-Aufgabe* mit einer höheren Fehlerrate für ältere Probanden mit geringer CR assoziiert war:

Bei insgesamt einer sehr geringen durchschnittlichen Fehlerrate von 2.3 % zu t1 und 2.6 % zu t2 in der *0-back-Aufgabe* waren zu beiden Zeitpunkten nur ein einzelner falscher Tastendruck und bei jeweils ca. 90 % der Probanden keine ausgelassenen Reaktionen zu beobachten. Aus diesem Grund wurde die Fehleranalyse auf die falschen Alarme beschränkt, die bei 43–50 % der Probanden auftraten. Die univariaten ANOVAs ergaben zu beiden Untersuchungszeitpunkten eine signifikante CR x Alter-Interaktion ( $F_{t1}(3,52) = 4.43, p < .05, \eta^2 = .08$ ;  $F_{t2}(3,45) = 5.23, p < .05, \eta^2 = .1$ ). Der Unterschied zwischen geringer und hoher CR innerhalb der gleichen Altersgruppe erwies sich in den univariaten ANOVAs mit  $p = .1$  für die jüngeren und  $p = .19$  für die älteren Gruppen als nicht signifikant. Es zeigte sich aber ein für beide Untersuchungszeitpunkte jeweils signifikanter Unterschied in der Anzahl falscher Alarme zwischen den jüngeren und älteren Probanden innerhalb der Gruppe mit einer geringen CR ( $F_{t1}(1,30) = 6.04, p < .05, \eta^2 = .17$ ;  $F_{t2}(1,24) = 5.76, p < .05, \eta^2 = .19$ ; t1 (t2): jung = 28.6 % (28.6 %), alt = 61.1 % (77.8 %)), der in der Gruppe mit einer hohen CR nicht signifikant unterschiedlich war (t1:  $p = .53$ ; t2:  $p = .35$ ).

In der *2-back-Aufgabe* lag zu t1 ( $F(1,53) = 3.61$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .06$ ), jedoch nicht zu t2 ( $p = .14$ , n.s.) und in der *Sternberg-(sukz.)Aufgabe* zu t2 ( $F(1,45) = 2.80$ ,  $p = .1$ ,  $\eta^2 = .06$ ) eine Tendenz zu höheren Fehlerraten älterer Probanden mit einer geringen CR vor (*2-back*: CR1 = 5.2, CR2 = 2.6,  $p < .05$ ; *Sternberg-(sukz.)*: CR1 = 15.2, CR2 = 6.3,  $p < .05$ ). In der *2-back-Aufgabe* ließ sich zu t1 in der älteren Probandengruppe ein signifikanter Fehleranstieg bei langen ITI beobachten ( $F(1,53) = 4.54$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .08$ ; kurzes ITI: jung = 1.5, alt = 2.5; langes ITI: jung = 2.7, alt = 5.5).

In der *Switch-Aufgabe* war zu beiden Untersuchungszeitpunkten eine tendenzielle CR x Alter-Interaktion ( $F_{t1}(1,53) = 2.82$ ,  $p < .1$ ,  $\eta^2 = .05$ , n.s.;  $F_{t2}(1,45) = 3.45$ ,  $p = .07$ ,  $\eta^2 = .07$ , n.s.) mit mehr fehlerhaften Trials bei älteren Probanden mit einer geringen CR zu verzeichnen. Zudem ergab sich in der *Switch-Aufgabe* zu t2 eine signifikante Fehlerart x CR x Alter-Interaktion ( $F(1,45) = 4.83$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .1$ ) mit einer besonders hohen Quote an fehlerhaften Tastendrücken im Vergleich zu falschen Alarmen und ausgelassenen Antworten in der älteren Probandengruppe mit geringer CR.

### **Zwischenfazit**

Die Annahme, dass die CR in der älteren Gruppe die untersuchten Leistungsparameter stärker beeinflusst, kann tendenziell bestätigt werden. In der Reaktionsgeschwindigkeit gab es keinen altersabhängigen Unterschied im Einfluss der CR. Es zeigte sich lediglich eine Tendenz zu längeren Reaktionszeiten älterer Probanden mit geringer CR in der anspruchsvollen Bedingung in einer AG-Aufgabe (*2-back*). Es lag jedoch ein altersabhängiger Unterschied zwischen den beiden CR-Gruppen in der Veränderung der AG-Kapazität in der Zeit. Während jüngere Probanden mit hoher CR zu beiden Testzeitpunkten eine hohe Leistung erzielten, verbesserten jüngere Probanden mit einer geringen CR numerisch ihre geringere Ausgangsleistung. Eine Leistungsverbesserung ist auch älteren Probanden mit hoher CR gelungen, während ältere Probanden mit einer geringen CR numerisch eine Leistungsverschlechterung erfahren haben. Weiterhin lag im Sinne der Hypothese in drei von



sechs Aufgaben (AG: 2-back, Sternberg-(sukz.), KF: Switch) eine Tendenz zu höheren Fehlerraten älterer Probanden mit einer geringen CR vor.

- (1d) *Probanden mit einer hohen kognitiven Reserve profitieren von der Wiederholungstestung und zeigen eine Leistungsverbesserung. Bei Probanden mit einer geringen kognitiven Reserve verschlechtert sich die Leistung oder bleibt erhalten.*

### *Reaktionszeit*

Die mittleren globalen Reaktionszeitmaße wurden in einer ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren Alter und CR analysiert. Es konnte lediglich ein signifikanter Haupteffekt des Untersuchungszeitpunktes ( $F(1,44) = 20.30$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = 3.2$ ,  $t_1 = 769$  ms,  $t_2 = 740$  ms) mit insgesamt schnelleren Reaktionen in der Wiederholungsuntersuchung festgestellt werden. Kein Interaktionseffekt mit dem Innersubjektfaktor Zeit war signifikant.

Die separate varianzanalytische Auswertung pro Aufgabe mit den Innersubjektfaktoren Zeit und Aufgabenbedingung und den beiden Zwischensubjektfaktoren Alter und CR ergab nur in der Sternberg-(sukz.)Aufgabe (AG) eine Zeit x CR-Interaktion ( $F(1,45) = 7.23$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .14$ ). Entgegen der Hypothese unterschieden sich die Reaktionszeitmediane in der Gruppe mit hoher CR nicht zwischen den Testzeitpunkten ( $t_1 = 819$  ms,  $t_2 = 820$  ms), zugleich verkürzte sich die Reaktionszeit in der Gruppe mit geringer CR von 867 ms zum ersten auf 806 ms zum zweiten Testzeitpunkt. Keine weitere Interaktion unter Betrachtung des Testzeitpunktes und CR war signifikant. Deskriptiv hatte die Gruppe mit der hohen CR jedoch in vier von sechs Aufgaben eine größere  $t_1$  minus  $t_2$  Differenz sowie insgesamt eine kleinere Streuung in den mittleren Reaktionszeiten (Tab. 10).

**Tabelle 10.** Die durchschnittliche Differenz der Reaktionszeitmediane ( $M_d$ ) zwischen dem ersten und zweiten Untersuchungszeitpunkt ( $t_1-t_2$ ) sowie Standardabweichungen (SD) pro Aufgabe und CR (CR1 = gering, CR2 = hoch)

| Aufgabe                  | $M_d$ (SD)            |                     | $p$             |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
|                          | CR1                   | CR2                 |                 |
| <i>0-back</i>            | –.92 (33.60)          | –.40 (32.22)        | n.s.            |
| <i>2-back</i>            | 19.96 (93.48)         | 37.20 (80.20)       | n.s.            |
| <i>Sternberg-(sukz.)</i> | <b>46.63 (128.80)</b> | <b>4.13 (84.89)</b> | <b>&lt; .01</b> |
| <i>Sternberg-(sim.)</i>  | 27.22 (150.15)        | 28.00 (63.35)       | n.s.            |
| <i>Stroop</i>            | 37.90 (143.22)        | 58.14 (64.25)       | n.s.            |
| <i>Switch</i>            | 49.04 (154.89)        | 58.67 (69.05)       | n.s.            |

Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ .

### AOSPAN

Die jeweiligen mixed ANOVAs mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter über den AOSPAN-Absolut-Score (Anzahl korrekter Buchstabensets), AOSPAN-Partial-Score (Anzahl korrekter Buchstaben) bzw. die Rechenfehler ergaben nur für den AOSPAN-Partial-Score eine tendenzielle Verbesserung vom ersten zum zweiten Untersuchungszeitpunkt ( $F(1,45) = 3.20$ ,  $p = .08$ ,  $\eta^2 = .07$ ,  $t_1 = 47$ ,  $t_2 = 50$ ). Diese war jedoch unabhängig von der CR.

### Fehlerrate

Die ANOVA mit Messwiederholung mit dem Innersubjektfaktor Zeit und den Zwischensubjektfaktoren Alter und CR ergab für den Fehlerindex (FA, ER, OM) keinen signifikanten Haupt- ( $p = .95$ ) oder Interaktionseffekt des Untersuchungszeitpunktes.

Bei der separaten Auswertung pro Aufgabe mit den Innersubjektfaktoren Zeit und Fehlerart sowie den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter zeigte sich nur in der *Stroop-Aufgabe* (IK) bei einer insgesamt sehr geringen Fehlerrate ( $t_1 = 4\%$ ,  $t_2 = 2.5\%$ ) eine marginal signifikante Zeit x Fehlerart x CR-Interaktion ( $F(1.08,46.36) = 3.53$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .08$ ), der zu  $t_2$  eine Halbierung der fehlerhaften Tastendrucke in der Gruppe mit einer geringen CR zugrunde lag

( $t_1 = 4.4 \%$ ,  $t_2 = 2.3 \%$ ), während sich die fehlerhaften Tastendrucke für die Gruppe mit einer hohen CR kaum veränderten ( $t_1 = 3.4 \%$ ,  $t_2 = 2.9 \%$ ).

### **Zwischenfazit**

Die Hypothese, dass Probanden mit einer hohen CR stärker von der Wiederholungsuntersuchung profitieren, konnte nicht bestätigt werden. Es lagen zwar im Unterschied zur Ersttestung in der Wiederholungsuntersuchung in vier von sechs Aufgaben numerisch kürzere Reaktionszeiten bei hoher CR vor, signifikant erwies sich jedoch nur die Reaktionszeitreduktion in der Gruppe mit geringer CR in der *Sternberg-(sukz.)Aufgabe*. Auch für die AG-Kapazität zeigte sich bei altersunabhängiger Betrachtung u. a. aufgrund eines Deckeneffektes bei jüngeren Probanden mit hoher CR die zeitliche Leistungsveränderung als CR-unabhängig. Für die Fehlerrate gab es entgegen der Hypothese in der Wiederholungsuntersuchung eine tendenzielle Fehlerreduktion bei geringer CR in der Inhibitionskontrollleistung (*Stroop*).

## **6.2 Elektrophysiologische Daten**

Die durchschnittlichen P3-Amplituden und -Latenzen pro Aufgabe und Untersuchungszeitpunkt sind aufgeteilt nach CR und Alter in den Anhängen N–Q zu finden.

Die Korrelationsanalyse der P3-Amplitude an der Pz-Elektrode ergab unter keiner Aufgabenbedingung der insgesamt sechs Aufgaben signifikante Korrelationen zur CR ( $p > .1$ ). Einen signifikanten Zusammenhang zwischen der P3-Amplitude und dem Alter der Probanden gab es zum zweiten Untersuchungszeitpunkt in der *2-back-Aufgabe* ( $r = .3$ ,  $p < .05$ ), während die restlichen Korrelationen nicht signifikant waren ( $p > .1$ ).

Die Betrachtung des korrelativen Zusammenhangs zwischen mehreren Kovariablen (Geschlecht, sportliche Aktivität, Zigaretten- und Alkoholkonsum sowie Ein- und Durchschlafstörungen) und der P3-Amplitude ergaben zu  $t_1$  signifikante Assoziationen zur sportlichen Betätigung mittlerer Anstrengung in der *2-back-Aufgabe* ( $p < .05$ ), den Durchschlafstörungen in der *Sternberg-(sim.)Aufgabe* ( $p < .05$ ) sowie dem Geschlecht in der *2-back-* ( $p = .05$ ) und der *Switch-Aufgabe* ( $p < .01$ ). Zu  $t_2$  war erneut die Assoziation der P3-Amplitude zur sportlichen Betätigung mit mittlerer (*2-back*, *Switch*, jeweils  $p < .05$ ) sowie größerer Anstrengung (*0-back*, *2-back*, *Sternberg-(sim.)*, jeweils  $p < .05$ ) signifikant. Es

werden nur Ergebnisse der ANCOVA berichtet, wenn diese zur ANOVA abweichende Ergebnisse liefert.

Für die P3-Latenz an der Pz-Elektrode zeigte sich zu t1 in vier von insgesamt sechs Aufgaben ein signifikant negativer korrelativer Zusammenhang zur CR (*0-back* ( $r_s = -.32$ ,  $p < .05$ ), *2-back* ( $r_s = -.38$ ,  $p < .01$ ), *Sternberg-(sim.)* ( $r_s = -.34$ ,  $p = .01$ ), *Sternberg-(sukz.)* ( $r_s = -.47$ ,  $p < .001$ )). In der Wiederholungsuntersuchung war die P3-Latenz in insgesamt fünf von sechs Aufgaben signifikant negativ mit der CR assoziiert (*0-back-* ( $r_s = -.32$ ,  $p < .05$ ), *2-back-* ( $r_s = -.33$ ,  $p < .05$ ), *Sternberg-(sim.)-* ( $r_s = -.28$ ,  $p = .05$ ), *Switch-* ( $r = -.48$ ,  $p = .001$ ) und *Stroop-Aufgabe* ( $r_s = -.35$ ,  $p < .05$ )). Das Alter der Probanden zeigte signifikant positive Korrelationen zur P3-Latenz in der *0-back-* ( $r = .27$ ,  $p < .05$ ) zum ersten und der *Stroop-Aufgabe* ( $r = .3$ ,  $p < .05$ ) zum zweiten Untersuchungszeitpunkt.

Die Korrelationsanalyse der Kovariablen (Geschlecht, sportliche Aktivität, Zigaretten- und Alkoholkonsum sowie Ein- und Durchschlafstörungen) ergab für die P3-Latenz zu t1 signifikante Korrelationen für die *Switch-Aufgabe* mit den Einschlafstörungen ( $r_s = .26$ ,  $p < .05$ ), die *0-back-Aufgabe* mit dem Geschlecht ( $r_s = -.3$ ,  $p < .05$ ) und die *Stroop-Aufgabe* mit Sport geringer Anstrengung ( $r = .5$ ,  $p < .001$ ) sowie mit Aktivitäten größerer Anstrengung ( $r = .38$ ,  $p < .01$ ). Zu t2 lagen signifikante Korrelationen in der *Sternberg-(sukz.)*Aufgabe mit dem Geschlecht ( $r = .4$ ,  $p < .01$ ), der *Stroop-Aufgabe* mit Durchschlafstörungen ( $r_s = .4$ ,  $p < .01$ ) und der *Sternberg-(sim.)*Aufgabe ( $r = -.36$ ,  $p < .05$ ) sowie der *Switch-Aufgabe* ( $r = .35$ ,  $p < .05$ ) mit Aktivitäten größerer Anstrengung vor. Analog zur P3-Amplitude werden die Ergebnisse der ANCOVA nur dann berichtet, wenn Abweichungen zur ANOVA vorliegen.

Im Folgenden werden hypothesengeleitet die varianzanalytischen Befunde zur P3-Amplitude und Latenz in Abhängigkeit von der CR, dem Alter, der Aufgabe und der Aufgabenbedingung, soweit nicht anders vermerkt, an der Pz-Elektrode berichtet.

*(2a) Aufgrund einer größeren neuralen Effizienz und Kapazität weisen Personen mit einer hohen im Vergleich zur geringen kognitiven Reserve kleinere P3-Amplituden in einfachen, und größere P3-Amplituden in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen auf.*

Die mixed ANOVAs über die sechs Aufgaben mit den Innersubjektfaktoren Zeit und Aufgabenbedingung sowie den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter ergaben mit Ausnahme der *2-back-Aufgabe* ( $p = .58$ ) jeweils einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Bedingung ( $p < .001$ , P3-Amplituden siehe Tab. 11) mit höheren P3-Amplituden in folgenden

Bedingungen: *0-back*: langes ITI; *Sternberg-(sim.)*: kurzes MS; *Sternberg-(sukz.)*: langes MS; *Stroop*: kongruente Trials; *Switch*: repeat Trials.

Der Faktor CR war in keiner Aufgabe signifikant.

**Tabelle 11.** Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der P3-Peak-Amplituden (in  $\mu\text{V}$ ) an Pz in Abhängigkeit von Aufgabe, der kognitiven Reserve (CR1 = gering, CR2 = hoch), dem Untersuchungszeitpunkt (t1 = 2013, t2 = 2015) sowie der Aufgabenbedingung (Bedingung 1 = einfach, Bedingung 2 = anspruchsvoll)

| Aufgabe                       | Zeit | M (SD)                          |                            | N     | p                |
|-------------------------------|------|---------------------------------|----------------------------|-------|------------------|
|                               |      | Bedingung 1<br>CR1; CR2         | Bedingung 2<br>CR1; CR2    |       |                  |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 14.76 (5.54); 14.49 (7.10)      | 16.46 (5.12); 16.36 (6.68) | 32/24 | n.s.             |
|                               | t2   | 16.85 (4.53); 14.76 (6.72)      | 17.97 (5.07); 16.14 (7.01) | 26/23 |                  |
| <i>2-back</i>                 | t1   | 11.33 (5.37); 11.09 (4.74)      | 10.34 (4.99); 11.78 (6.40) | 31/25 | n.s.             |
|                               | t2   | 12.92 (5.03); 12.34 (5.83)      | 12.78 (5.05); 13.75 (6.85) | 26/23 |                  |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 8.41 (5.45); 7.29 (5.88)        | 11.11 (5.47); 9.88 (6.26)  | 32/24 | n.s.             |
|                               | t2   | 8.64 (5.80); 7.97 (5.34)        | 10.57 (5.44); 8.02 (5.09)  | 26/23 |                  |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 8.03 (4.81); 7.81 (5.04)        | 6.43 (5.42); 4.63 (4.52)   | 32/25 | n.s.             |
|                               | t2   | 10.25 (4.53); 8.72 (5.69)       | 7.36 (4.55); 5.98 (5.61)   | 26/23 |                  |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 8.13 (4.01); 8.83 (4.76)        | 7.17 (4.01); 7.53 (4.62)   | 31/24 | n.s.             |
|                               | t2   | 10.24 (4.65); 8.12 (4.61)       | 7.10 (3.91); 7.0 (5.4)     | 25/19 |                  |
| <i>Switch</i>                 | t1   | 6.92 (3.23); 8.45 (4.45)        | 5.92 (3.81); 6.48 (4.05)   | 32/25 | <b>(&lt;.01)</b> |
|                               | t2   | <b>8.30 (4.17); 9.74 (5.03)</b> | 7.23 (3.38); 6.71 (4.96)   | 26/23 |                  |

Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ . In Klammern gesetztes Signifikanzniveau gilt nur für die fett hervorgehobene Bedingung der jeweiligen Zeile.

Einen signifikanten Interaktionseffekt zwischen CR und Aufgabenbedingung gab es in einer von sechs Aufgaben (KF: *Switch-Aufgabe*). Dieser CR x Bedingung-Interaktion ( $F(1,45) = 7.95$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .15$ ) lag ein Amplitudenunterschied in der einfachen Aufgabenwiederholungsbedingung (repeat) zugrunde. Probanden mit hoher CR wiesen in dieser Bedingung im Vergleich zur Gruppe mit einer geringen CR numerisch höhere P3-Amplituden auf (CR1 =  $7.6 \mu\text{V}$ , CR2 =  $8.8 \mu\text{V}$ ,  $p = .27$ , n.s.), während die Amplitudenwerte für die anspruchsvollere Aufgabenwechselbedingung (switch) zwischen den

beiden CR-Gruppen vergleichbar waren ( $CR1 = 6.6 \mu V$ ,  $CR2 = 6.3 \mu V$ ). In den separaten ANOVAs getrennt für beide Untersuchungszeitpunkte war die Bedingung x CR-Interaktion bei numerisch ähnlich gerichteten Werten nur zu t2 signifikant ( $F(1,45) = 7.75$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .15$ ; t1:  $p = .108$ , n.s.).

Keine weiteren für beide Untersuchungszeitpunkte separat durchgeführten ANOVAs lieferten signifikante CR x Bedingung-Interaktionseffekte.

### **Zwischenfazit**

Die hypothetische Annahme, dass eine hohe CR mit kleineren P3-Amplituden in einfachen und größeren P3-Amplituden in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen assoziiert ist, konnte nicht bestätigt werden. Die P3-Amplituden an Pz variierten zwar systematisch in Abhängigkeit von der Aufgabenbedingung, der Unterschied war jedoch insgesamt nicht CR-abhängig. Hypothesenkonträr zeigten sich in einer Aufgabe (KF: *Switch*) bei hoher CR höhere P3-Amplituden in der einfacheren Aufgabenbedingung (repeat trials).

*(2b) Eine hohe kognitive Reserve geht insgesamt und insbesondere in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen mit einer schnelleren mentalen Verarbeitungsgeschwindigkeit einher, weshalb kürzere P3-Latenzen zu erwarten sind.*

Die mixed ANOVAs pro Aufgabe mit den Innersubjektfaktoren Zeit und Aufgabenbedingung und den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter zeigten in zwei Aufgaben einen signifikanten P3-Latenzunterschied in Abhängigkeit von der Aufgabenbedingung mit längeren P3-Latenzen bei kurzen ITI in der *0-back-Aufgabe* ( $p < .01$ ) und langen MS in der *Sternberg-(sukz.)Aufgabe* ( $p < .001$ ).

In vier von sechs Aufgaben (*0-back*-, *2-back*-, *Sternberg-(sim.)*- und *Switch-Aufgaben*) ging eine hohe CR mit kürzeren P3-Latenzen einher.

Zugleich war in zwei von sechs Aufgaben (*2-back*, *Sternberg-(sukz.)*) eine signifikante Bedingung x CR-Interaktion mit kürzeren Latenzen in den jeweils einfacheren Aufgabenbedingungen in der Hoch-CR-Gruppe zu beobachten.

Der Tabelle 12 sind die mittleren P3-Latenzen an der Pz-Elektrode in Abhängigkeit von Aufgabe, CR, Zeit und Aufgabenbedingung zu entnehmen.

**Tabelle 12.** Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der P3-Peak-Latenzen (in ms) an Pz in Abhängigkeit von Aufgabe, kognitiver Reserve (CR1 = gering, CR2 = hoch), Untersuchungszeitpunkt (t1 = 2013, t2 = 2015) sowie der Aufgabenbedingung (Bedingung 1 = einfach, Bedingung 2 = anspruchsvoll)

| Aufgabe               | Zeit | M (SD)                      |                             | N     | p      |
|-----------------------|------|-----------------------------|-----------------------------|-------|--------|
|                       |      | Bedingung 1<br>CR1; CR2     | Bedingung 2<br>CR1; CR2     |       |        |
| 0-back                | t1   | <b>485 (104); 425 (67)</b>  | <b>458 (96); 431 (66)</b>   | 32/24 | <.05   |
|                       | t2   | <b>459 (70); 440 (77)</b>   | <b>440 (65); 401 (61)</b>   | 26/23 |        |
| 2-back                | t1   | <b>623 (131); 505 (146)</b> | <b>575 (132); 568 (141)</b> | 31/25 | <.05   |
|                       | t2   | <b>602 (101); 512 (149)</b> | <b>570 (135); 510 (156)</b> | 26/23 |        |
| Sternberg-<br>(sukz.) | t1   | <b>503 (96); 414 (77)</b>   | 520 (123); 505 (133)        | 32/24 | (<.05) |
|                       | t2   | <b>455 (58); 452 (101)</b>  | 476 (103); 503 (120)        | 26/23 |        |
| Sternberg-<br>(sim.)  | t1   | <b>557 (116); 501 (106)</b> | <b>579 (89); 484 (134)</b>  | 32/25 | <.05   |
|                       | t2   | <b>594 (86); 531(108)</b>   | <b>544 (112); 519 (126)</b> | 26/23 |        |
| Stroop                | t1   | 517 (132); 530 (153)        | 504 (136); 501 (147)        | 31/24 | n.s.   |
|                       | t2   | 546 (116); 513 (149)        | 566 (133); 474 (125)        | 25/19 |        |
| Switch                | t1   | <b>536 (104); 494 (112)</b> | <b>511 (115); 474 (92)</b>  | 32/25 | <.05   |
|                       | t2   | <b>532 (107); 490 (91)</b>  | <b>589 (98); 486 (99)</b>   | 26/23 |        |

Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ . In Klammern gesetztes Signifikanzniveau gilt nur für die fett hervorgehobene Bedingung der jeweiligen Zeile.

In der *0-back-Aufgabe* ließ sich mit  $p = .075$  ( $F(1,44) = 3.32$ ,  $\eta^2 = .07$ ) zunächst ein Trend zu kürzeren Latenzen bei einer hohen im Vergleich zur geringen CR (424 ms vs. 460 ms) beobachten. Der Einbezug des Geschlechts als Kovariable führte zur Signifikanz des Haupteffekts der CR ( $F(1,44) = 6.04$ ,  $\eta^2 = .12$ ,  $p < .05$ ). Die getrennte Betrachtung zu beiden Untersuchungszeitpunkten zeigte sowohl zu t1 wie zu t2 marginal signifikant bzw. signifikant kürzere P3-Latenzen für die Hoch-CR-Gruppe ( $F_{t1}(1,52) = 3.70$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .07$ , CR1 = 468 ms, CR2 = 429 ms, ANCOVA:  $p = .01$ ;  $F_{t2}(1,45) = 2.76$ ,  $p = .1$ ,  $\eta^2 = .06$ , CR1 = 450 ms, CR2 = 420 ms).

Der Haupteffekt des Faktors CR war in der *2-back-* ( $F(1,45) = 5.42$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .11$ ), der *Sternberg-(sim.)-* ( $F(1,45) = 5.03$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .1$ ) und der *Switch-Aufgabe* ( $F(1,45) = 4.22$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ ) jeweils signifikant mit ebenfalls kürzeren P3-Latenzen bei einer hohen CR

(*2-back*: 525 ms vs. 594 ms; *Sternberg-(sim.)*: 517 ms vs. 568 ms; *Switch*: 493 ms vs. 543 ms). Die separate Auswertung für beide Untersuchungszeitpunkte erwies für die *2-back-Aufgabe* zu beiden Zeitpunkten einen marginal signifikanten und signifikanten Haupteffekt der CR ( $F_{t1}(1,52) = 3.64$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .07$ , CR1 = 597 ms, CR2 = 535 ms;  $F_{t2}(1,45) = 4.48$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .09$ , CR1 = 586 ms, CR2 = 515 ms). Für die anderen beiden Aufgaben ergaben sich bei hoher CR zu beiden Zeitpunkten numerisch kürzere Latenzen (Tab. 2), der Unterschied war aber jeweils nur zu einem Untersuchungszeitpunkt signifikant (*Sternberg-(sim.)* zu t1:  $F(1,53) = 8.55$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .14$ , CR1 = 567 ms, CR = 492 ms; *Switch* zu t2:  $F(1,45) = 5.73$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .11$ ; CR1 = 561 ms; CR2 = 499 ms).

In der *2-back-Aufgabe* ( $F(1,45) = 5.29$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .11$ ) zeigten zudem Probanden mit geringer CR längere P3-Latenzen in den einfacheren Trials mit kurzen ITI (kurz: CR1 = 618 ms, CR2 = 513 ms; lang: CR1 = 571 ms, CR2 = 538 ms). Die Bedingung x CR-Interaktion erreichte bei separater Betrachtung der Untersuchungszeitpunkte zu t1 die Signifikanz ( $F(1,52) = 8.04$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .13$ ).

Auch in der *Sternberg-(sukz.)Aufgabe* wiesen Hoch-CR-Probanden in der einfacheren Bedingung (kurzes MS) kürzere P3-Latenzen auf ( $F(1,44) = 6.06$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .12$ , kurz = 425 ms, lang = 507 ms), während bei Gering-CR-Probanden kein relevanter bedingungsabhängiger Latenzunterschied zu beobachten war (kurz = 472 ms, lang = 489 ms). Bei der zeitpunktabhängigen Analyse war die Bedingung x CR-Interaktion zu t1 signifikant ( $F(1,52) = 5.81$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .1$ ).

## Zwischenfazit

Die Hypothese, dass eine hohe CR mit einer rascheren mentalen Verarbeitungsgeschwindigkeit einhergeht, konnte weitestgehend bestätigt werden. Bis auf die *Stroop-Aufgabe* (IH) ging entweder bedingungsübergreifend (*0-back*-, *2-back*-, *Sternberg-(sim.)*- und *Switch-Aufgaben*) oder in einer der beiden Aufgabenbedingungen (*Sternberg-(sukz.)*) eine hohe CR mit kürzeren P3-Latenzen einher. Nicht bestätigt werden konnte, dass Hoch-CR-Probanden insbesondere in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen kürzere P3-Latenzen zeigen. Im Gegensatz zur Hypothese war die mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit (P3-Latenz) im Falle einer hohen CR eher in einfacheren Aufgabenbedingungen beschleunigt (*2-back*, *Sternberg-(sukz.)*).



*(2c) Die hypothetisch angenommenen CR-abhängigen Unterschiede in der Allokation mentaler Ressourcen (Hypothese 2a, P3-Amplitude) sowie der mentalen Verarbeitungsgeschwindigkeit (Hypothese 2b, P3-Latenz) fallen aufgrund einsetzender Alterungsprozesse für die ältere Probandengruppe stärker aus.*

### *P3-Amplitude*

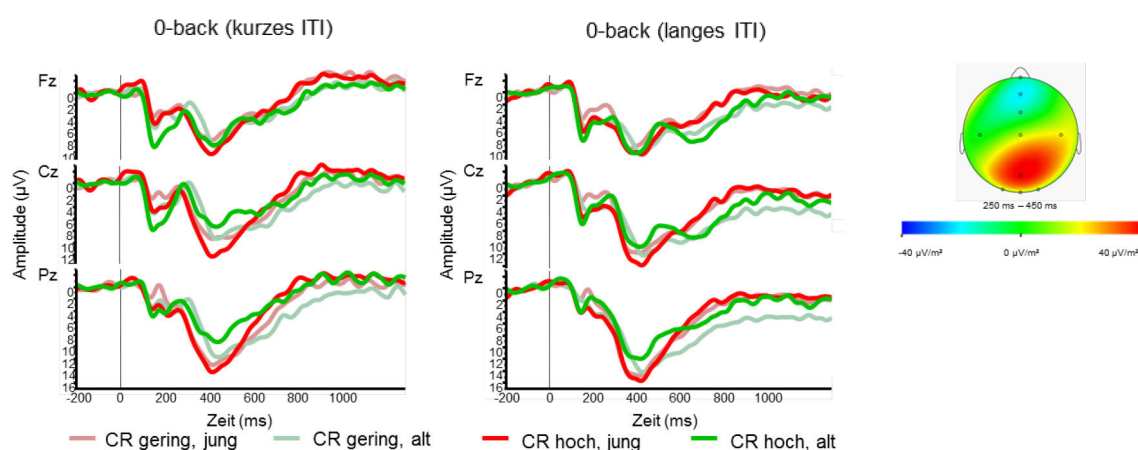
Die aufgabenabhängigen mixed ANOVAs mit den Innersubjektfaktoren Zeit und Aufgabenbedingung sowie den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter ergaben zwar keinen Haupteffekt des Alters, jedoch in der Hälfte der Aufgaben für eine der beiden Aufgabenbedingungen eine (marginal) signifikant kleinere Amplitude für ältere im Vergleich zu jüngeren Probanden (*0-back*: kurze ITI,  $p < .05$ ; *Sternberg-(sukz.)*: kurzes MS,  $p = .07$ ; *Stroop*: kongruente Trials,  $p < .05$ ).

In fünf der sechs Aufgaben lag eine CR x Alter-Interaktion vor (*0-back*-, *2-back*-, *Sternberg-(sim. und sukz.)*- und *Stroop-Aufgabe*) und in einer weiteren Aufgabe eine Zeit x Bedingung x CR x Alter-Interaktion (*Switch-Aufgabe*), die entweder mit höheren P3-Amplituden bei jüngeren (*Switch*- und *2-back-Aufgaben*) oder kleineren P3-Amplituden bei älteren Probanden (*0-back*-, *Sternberg-(sim. und sukz.)*-, *Stroop-Aufgaben*) bei hoher im Vergleich zur geringen CR einherging. Die CR und das Alter standen somit in allen untersuchten Aufgaben in einer Wechselwirkung, auf welche im Folgenden detailliert eingegangen wird.

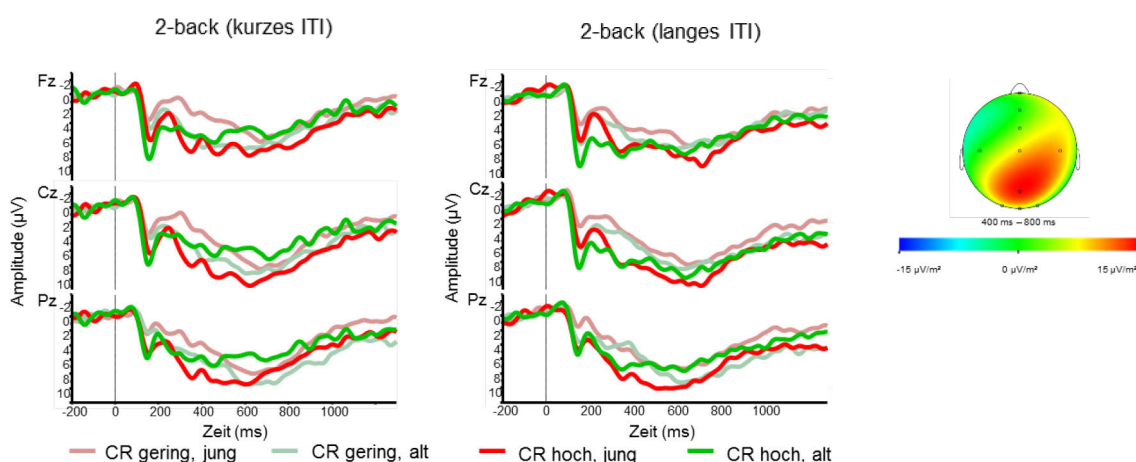
In der *0-back-Aufgabe* (Abb. 19) zeigte sich ein statistischer Trend ( $F(1,44) = 2.92$ ,  $p = .09$ ,  $\eta^2 = .06$ ) zu höheren P3-Amplituden älterer Probanden mit einer geringen ( $17.2 \mu V$ ) im Vergleich zur hohen CR ( $12.5 \mu V$ ), während sich die beiden jüngeren Probandengruppen nur unwesentlich voneinander unterschieden ( $CR1 = 16.6 \mu V$ ,  $CR2 = 17.3 \mu V$ ). Der Einbezug sportlicher Betätigung mit größerer Anstrengung als Kovariable veränderte die Analyseergebnisse und reduzierte den CR x Alter-Interaktionseffekt ( $p = .13$ , n.s.) bei einem zugleich marginal signifikanten Haupteffekt des Alters ( $F(1,43) = 3.73$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .08$ , jung =  $17 \mu V$ , alt =  $15 \mu V$ ). Die Auswertung pro Untersuchungszeitpunkt erbrachte zu beiden Zeitpunkten keine signifikante Alter x CR-Interaktion.

In der *2-back-Aufgabe* (Abb. 20) lag ein statistischer Trend ( $F(1,45) = 2.74$ ,  $p = .1$ ,  $\eta^2 = .06$ ) mit deskriptiv höheren Amplituden junger Probanden mit einer hohen im Vergleich zur geringen CR ( $CR1 = 10.4 \mu V$ ,  $CR2 = 13 \mu V$ ,  $p = .12$ , n.s.) und zugleich numerisch kleineren Amplituden älterer Probanden mit einer hohen im Vergleich zur geringen CR ( $CR1 = 13.6 \mu V$ ,  $CR2 = 11.6 \mu V$ ,  $p = .4$ , n.s.) vor. Nach der Herausparsialisierung des

Einfluss der drei Kovariablen Geschlecht, sportliche Betätigung mit mittlerer und großer Anstrengung stabilisierte sich der CR x Alter-Trend und blieb mit  $p = .08$  marginal signifikant. Die getrennten ANOVAs für die beiden Untersuchungszeitpunkte ergaben jeweils eine marginal signifikante CR x Alter-Interaktion ( $F_{t1}(1,52) = 2.65$ ,  $p = .1$ ,  $\eta^2 = .05$ , ANCOVA:  $F_{t1}(1,49) = 3.57$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .07$ ;  $F_{t2}(1,45) = 3.31$ ,  $p = .07$ ,  $\eta^2 = .07$ ) mit im Vergleich zur geringen CR höheren P3-Amplituden bei jüngeren Hoch-CR-Probanden (jung:  $t_1$ : CR1 = 10  $\mu\text{V}$ , CR2 = 12.5  $\mu\text{V}$ ,  $p < .1$ ;  $t_2$ : CR1 = 10.6  $\mu\text{V}$ , CR2 = 13.4  $\mu\text{V}$ ,  $p = .15$ , n.s.; alt:  $t_1$ : CR1 = 11.6  $\mu\text{V}$ , CR2 = 9.9  $\mu\text{V}$ ,  $p = .4$ , n.s.;  $t_2$ : CR1 = 15.1  $\mu\text{V}$ , CR2 = 12.4  $\mu\text{V}$ ,  $p = .28$ , n.s.).

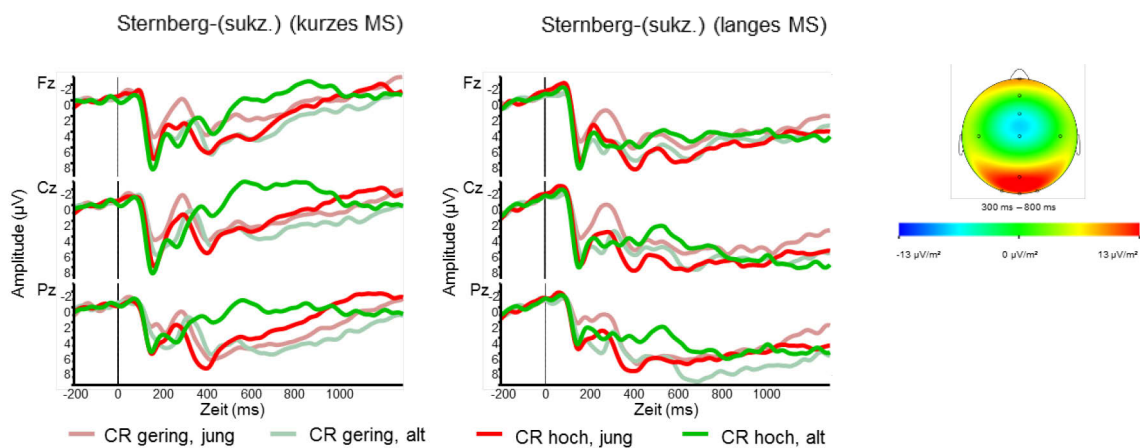


**Abbildung 19.** Der EKP-Kurvenverlauf sowie die topographische Verteilung in der 0-back-Aufgabe in Abhängigkeit vom Alter und der kognitiven Reserve (CR) unter den Bedingungen mit kurzem und langem Inter-Target-Intervall (ITI) zum ersten Untersuchungszeitpunkt an den Elektroden Fz, Cz und Pz



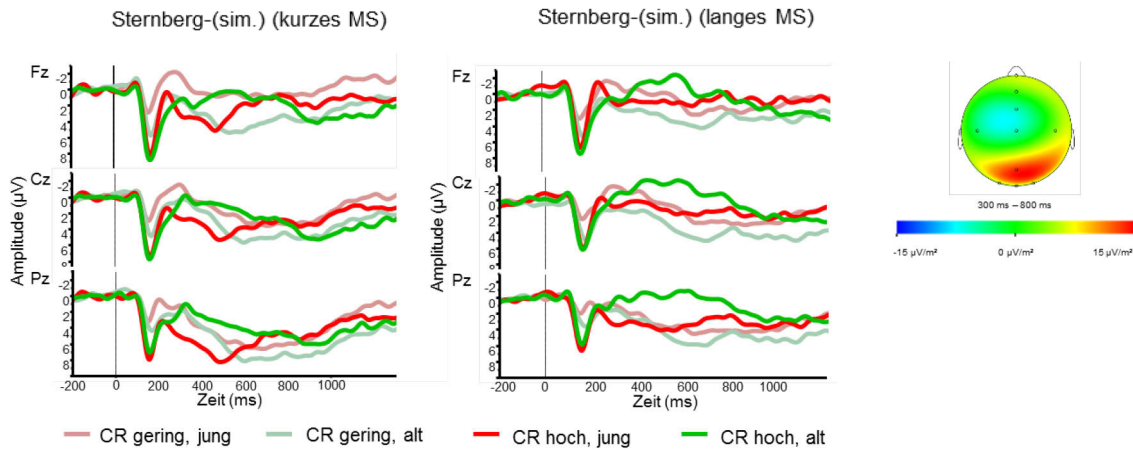
**Abbildung 20.** Der EKP-Kurvenverlauf sowie die topographische Verteilung in der 2-back-Aufgabe in Abhängigkeit vom Alter und der kognitiven Reserve (CR) unter den Bedingungen mit kurzem und langem Inter-Target-Intervall (ITI) zum ersten Untersuchungszeitpunkt an den Elektroden Fz, Cz und Pz

In der *Sternberg-(sukz.)Aufgabe* (Abb. 21) zeigte sich ein knapp die Signifikanzgrenze überschreitender Trend ( $F(1,44) = 3.84$ ,  $p = .056$ ,  $\eta^2 = .08$ ) zu kleineren P3-Amplituden bei älteren Probanden mit einer hohen CR (jung:  $CR1 = 9.4 \mu V$ ,  $CR2 = 9.8 \mu V$ ; alt:  $CR1 = 10.3 \mu V$ ,  $CR2 = 5.0 \mu V$ ). Der Einbezug zum zweiten Testzeitpunkt nicht untersuchter Probanden bei der getrennten ANOVA pro Untersuchungszeitpunkt erbrachte sowohl zu t1 wie zu t2 das gleiche Ergebnis mit einem marginal signifikanten CR x Alter-Interaktionseffekt ( $F_{t1}(1,52) = 3.88$ ,  $p = .05$ , jung:  $CR1 = 9.5 \mu V$ ,  $CR2 = 10.7 \mu V$ ,  $p = .5$ , n.s.; alt:  $CR1 = 10 \mu V$ ,  $CR2 = 5.7 \mu V$ ,  $p < .05$ ;  $\eta^2 = .07$ ;  $F_{t2}(1,45) = 3.40$ ,  $p = .07$ ,  $\eta^2 = .07$ , jung:  $CR1 = 9.1 \mu V$ ,  $CR2 = 9.0 \mu V$ ,  $p = .97$ , n.s.; alt:  $CR1 = 10.1 \mu V$ ,  $CR2 = 4.6 \mu V$ ,  $p < .05$ ).



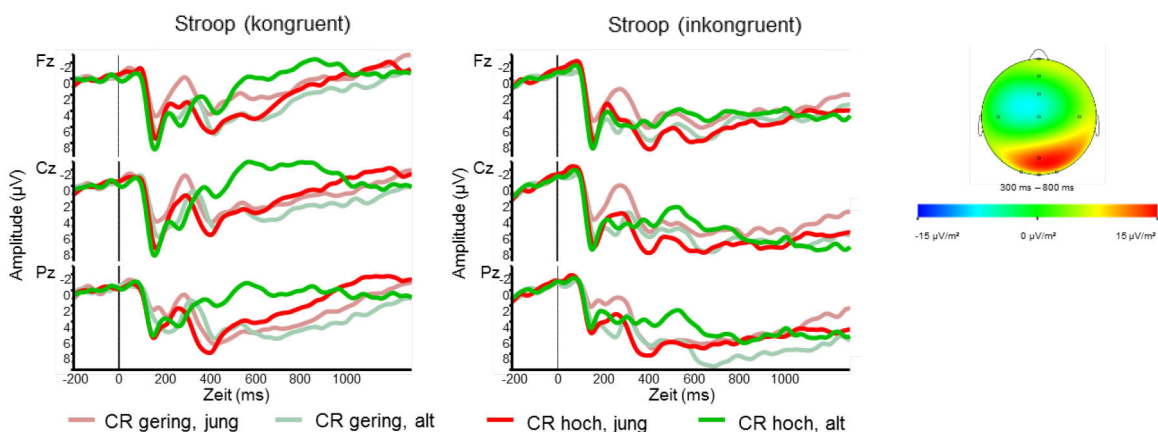
**Abbildung 21.** Der EKP-Kurvenverlauf sowie die topographische Verteilung in der Sternberg-(sukzessiv)Aufgabe in Abhängigkeit vom Alter und der kognitiven Reserve (CR) unter den Bedingungen mit kurzem und langem Memory-Set (MS) zum ersten Untersuchungszeitpunkt an den Elektroden Fz, Cz und Pz

Auch in der *Sternberg-(sim.)Aufgabe* (Abb. 22) hatten Hoch-CR-Ältere eine signifikant kleinere P3-Amplitude im Vergleich zu Älteren mit einer geringen CR ( $F(1,45) = 7.72$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .15$ ;  $CR1 = 8.4 \mu V$ ,  $CR2 = 3.9 \mu V$ ). Bei der getrennten ANOVA pro Zeitpunkt war der Interaktionseffekt zu t1 signifikant ( $F(1,53) = 7.42$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .12$ ; jung:  $CR1 = 6.3 \mu V$ ,  $CR2 = 8.1 \mu V$ ,  $p = .2$ , n.s.; alt:  $CR1 = 8.0 \mu V$ ,  $CR2 = 3.5 \mu V$ ,  $p < .05$ ) und verfehlte knapp die Signifikanzgrenze zu t2 ( $F(1,45) = 3.93$ ,  $p = .05$ ,  $\eta^2 = .08$ ; jung:  $CR1 = 8.3 \mu V$ ,  $CR2 = 8.8 \mu V$ ,  $p = .74$ , n.s.; alt:  $CR1 = 9.3 \mu V$ ,  $CR2 = 4.6 \mu V$ ,  $p < .05$ ) bei deskriptiv vergleichbaren Amplitudenwerten.



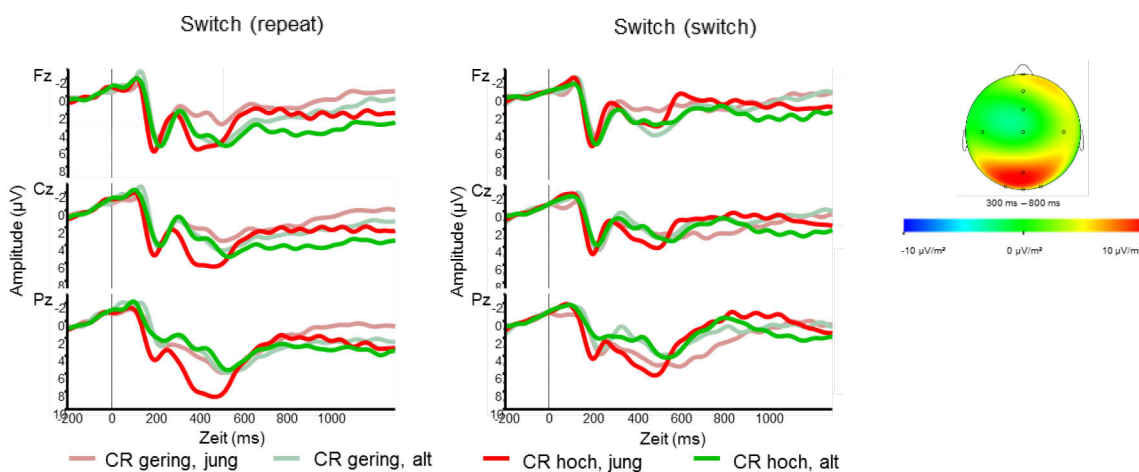
**Abbildung 22.** Der EKP-Kurvenverlauf sowie die topographische Verteilung in der Sternberg-(simultan)Aufgabe in Abhängigkeit vom Alter und der kognitiven Reserve (CR) unter den Bedingungen mit kurzem und langem Memory-Set (MS) zum ersten Untersuchungszeitpunkt an den Elektroden Fz, Cz und Pz

Auch in der *Stroop-Aufgabe* (Abb. 23) zeigte sich bei fehlenden Haupteffekten eine marginal signifikante CR x Alter-Interaktion ( $F(1,38) = 3.17$ ,  $p = .08$ ,  $\eta^2 = .08$ ), die sich bei den Analysen pro Untersuchungszeitpunkt zu t2 erneut als marginal signifikant erwies ( $F(1,40) = 3.60$ ,  $p = .06$ ,  $\eta^2 = .08$ , n.s.). Innerhalb der Gruppe junger Erwachsener zeigten Probanden mit einer hohen CR numerisch höhere Amplituden ( $CR1 = 7.9 \mu V$ ,  $CR2 = 9.3 \mu V$ ,  $p = .4$ , n.s.), während ältere Probanden mit einer hohen CR kleinere Amplituden aufwiesen ( $CR1 = 8.3 \mu V$ ,  $CR2 = 5.2 \mu V$ ,  $p = .1$ , n.s.).



**Abbildung 23.** Der EKP-Kurvenverlauf sowie die topographische Verteilung in der Stroop-Aufgabe in Abhängigkeit vom Alter und der kognitiven Reserve (CR) unter den Bedingungen mit kongruenten und inkongruenten Trials zum ersten Untersuchungszeitpunkt an den Elektroden Fz, Cz und Pz

Die Zeit x Bedingung x CR x Alter-Interaktion ( $F(1,45) = 5.30, p < .05, \eta^2 = .11$ ) in der *Switch-Aufgabe* (Abb. 24) basierte auf einem Amplitudenunterschied zum ersten Untersuchungszeitpunkt (Bedingung x CR x Alter-Interaktion:  $F(1,53) = 8.74, p < .01, \eta^2 = .14$ ), der auf höhere Amplitudenwerte junger Probanden in der Gruppe mit hoher CR in der Aufgabenwiederholungsbedingung zurückzuführen war (repeat: CR1 = 7  $\mu\text{V}$ , CR2 = 9.6  $\mu\text{V}$ ,  $p < .01$ ; switch: CR1 = 7.2  $\mu\text{V}$ , CR2 = 7.1  $\mu\text{V}$ ), während sich in allen weiteren Versuchsbedingungen die P3-Amplituden innerhalb der Altersgruppen zwischen der hohen und geringen Ausprägung der CR kaum numerisch unterschieden (alt: repeat: CR1 = 6.9  $\mu\text{V}$ , CR2 = 6.7  $\mu\text{V}$ ; switch: CR1 = 5  $\mu\text{V}$ , CR2 = 5.5  $\mu\text{V}$ ).



**Abbildung 24.** Der EKP-Kurvenverlauf sowie die topographische Verteilung in der Switch-Aufgabe in Abhängigkeit vom Alter und der kognitiven Reserve (CR) unter den Bedingungen mit Wiederholungs-(repeat)- und Wechsel-(switch)Trials zum ersten Untersuchungszeitpunkt an den Elektroden Fz, Cz und Pz

### P3-Latenz

Die mixed Varianzanalyse über beide Zeitpunkte und die jeweiligen Aufgabenbedingungen mit den Zwischenssubjektfaktoren CR und Alter über die P3-Latenz an der Pz-Elektrode ergab mit der Ausnahme der *Stroop-Aufgabe* ( $F(1,38) = 9.79, p < .01, \eta^2 = .21$ , jung = 484 ms, alt = 585 ms) keinen signifikanten Haupteffekt des Alters.

Auch lag bis auf eine marginal signifikante Alter x CR x Zeit-Interaktion in der *Switch-Aufgabe* ( $F(1,45) = 3.33, p = .07, \eta^2 = .07$ ) in keiner der untersuchten Aufgaben ein signifikanter CR x Alter-Interaktionseffekt vor. Vom ersten zum zweiten Zeitpunkt nahm in der *Switch-Aufgabe* bei Gering-CR-Jüngeren die P3-Latenz um ca. 50 ms zu ( $t1 = 507$  ms,

t2 = 559 ms), während für Hoch-CR-Jüngere kein relevanter Latenzunterschied zu beobachten war (t1 = 476 ms, t2 = 463 ms). In der älteren Gruppe war deskriptiv betrachtet CR-unabhängig eine Zunahme der P3-Latenzen zu beobachten (CR1: t1 = 542 ms, t2 = 562 ms; CR2: t1 = 476 ms, t2 = 536 ms).

### Zwischenfazit

Die Annahme, dass Unterschiede in der P3-Amplitude und -Latenz zwischen hoher und geringer CR insbesondere bei älteren Probanden zu beobachten sind, lässt sich nur zu einem geringen Teil bestätigen. In fünf der sechs Aufgaben (Ausnahme: *Switch* (KF)) zeigten sich hypothesenkonform durchgehend numerisch kleinere P3-Amplituden bei älteren Probanden mit einer hohen im Vergleich zur geringen CR. Davon waren zwei Effekte marginal (*Sternberg-(sukz.)*, *Stroop*) und ein Effekt statistisch signifikant (*Sternberg-(sim.)*). Zugleich unterschieden sich aber auch jüngere Probanden in Abhängigkeit von der CR (*2-back*, *Switch*) in zu Älteren entgegengesetzter Richtung durch höhere P3-Amplituden bei einer hohen CR. Numerisch waren bei nicht vorliegender statistischer Signifikanz auch in den restlichen vier Aufgaben (*0-back*, *Sternberg-(sim. und sukz.)*, *Stroop*) die P3-Amplituden im Schnitt höher für jüngere Probanden mit einer hohen im Vergleich zur geringen CR. Es kann somit nicht zweifelsfrei geschlussfolgert werden, dass die CR vorrangig in der älteren Probandengruppe mit einer Veränderung zentralnervöser Prozesse einhergeht.

Es konnte zudem kein Hinweis eines stärkeren Einflusses der CR bei älteren im Vergleich zu jüngeren Probanden auf die mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit beobachtet werden. In der *Switch*-Aufgabe war eine Latenzverzögerung der jüngeren Gering-CR-Gruppe von t1 zu t2 zu konstatieren, während sich bei älteren Probanden, wenn auch auf unterschiedlichem Niveau numerisch eine von der CR unabhängige Latenzzunahme andeutete.

*(2d) Die Amplituden- und Latenzunterschiede in Abhängigkeit von der CR lassen sich nach zwei Jahren replizieren. Weiterhin wird eine altersbedingte Latenzverzögerung der P3 angenommen, die für Probanden mit einer hohen kognitiven Reserve in der Wiederholungsuntersuchung geringer ausfällt als für Probanden mit einer geringen kognitiven Reserve.*

### *P3-Amplitude*

In den mixed ANOVAs pro Aufgabe mit den Innersubjektfaktoren Zeit und Aufgabenbedingung und den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter zeigte sich in vier von sechs Aufgaben (*2-back*-, *Sternberg-(sim. und sukz.)*- und *Switch-Aufgaben*) ein marginal signifikanter bis signifikanter Haupteffekt des Untersuchungszeitpunktes auf die mittleren P3-Amplituden. In zwei Aufgaben ergaben sich durchschnittlich höhere (*Sternberg-(sim.)*:  $t_1 = 6.3 \mu V$ ,  $t_2 = 7.8 \mu V$ ,  $p < .05$ ; *Switch*:  $t_1 = 6.8 \mu V$ ,  $t_2 = 7.8 \mu V$ ,  $p < .05$ ) und in zwei Aufgaben durchschnittlich kleinere Amplitudenwerte (*Sternberg-(sukz.)*:  $t_1 = 9 \mu V$ ,  $t_2 = 8.2 \mu V$ ,  $p = .08$ , n.s.; *2-back*:  $t_1 = 11.4 \mu V$ ,  $t_2 = 12.9 \mu V$ ,  $p < .01$ ) zu  $t_2$ . In keiner der untersuchten Aufgaben stand der Untersuchungszeitpunkt in einer Wechselwirkung mit der CR oder dem Alter der Probanden.

### *P3-Latenz*

Die aufgabenabhängigen mixed ANOVAs mit den jeweils zweistufigen Innersubjektfaktoren Zeitpunkt und Aufgabenbedingung sowie den Zwischensubjektfaktoren CR und Alter zeigten nur in der *Switch-Aufgabe* einen signifikanten Haupteffekt des Untersuchungszeitpunktes ( $F(1,45) = 4.57$ ,  $p < .05$ ,  $\eta p^2 = .09$ ) mit längeren P3-Latenzen zu  $t_2$  ( $t_1 = 506$  ms,  $t_2 = 530$  ms). Die Latenzverzögerung war jedoch unabhängig von der CR ( $p = .3$ ).

Es konnten keine relevanten Interaktionseffekte verzeichnet werden.

### **Zwischenfazit**

Die Hypothese konnte teilweise bestätigt werden. Hypothesenkonform hatte die CR aufgrund des fehlenden Interaktionseffektes mit dem Untersuchungszeitpunkt zu beiden Zeitpunkten einen vergleichbaren Einfluss auf die P3-Amplituden und -Latenzen. Somit können die Ergebnisse der Erst- durch die Zweituntersuchung als repliziert gelten.

Zugleich konnte jedoch kein entwicklungsrelevanter Vorteil der CR auf die mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit in dem zweijährigen Untersuchungsintervall festgestellt werden. Es können somit auf der Grundlage vorliegender Ergebnisse keine Aussagen über den Einfluss der CR auf die P3-Latenz in der Zeit getroffen werden.

**(2e) Kognitive Reserve steht im Zusammenhang zum Anterior-Shift der P3.**

Die normalisierten gemittelten Spannungswerte der parietalen (P3PzP4), zentralen (C3CzC4) und frontalen (F3FzF4) Elektroden wurden getrennt für die sechs untersuchten Aufgaben einer ANOVA mit Messwiederholung zugeführt (Innersubjektfaktoren: Zeit, Aufgabenbedingung und Elektrode; Zwischensubjektfaktoren: CR und Alter).

Eine altersassoziierte verstärkte frontale Aktivität zeigte sich in drei von sechs Aufgaben durch einen Interaktionseffekt zwischen Elektrode und Alter (*Sternberg-(sim.)* ( $F(2,73.5) = 3.82, p < .05, \eta^2 = .08$ ), *Stroop* ( $F(2,66.1) = 2.64, p = .08, \eta^2 = .07$ ), *Switch* ( $F(2,76.4) = 3.78, p < .05, \eta^2 = .08$ )) mit jeweils einer U-förmigen Aktivierung von parietal über zentral nach frontal in der älteren Probandengruppe und einer abnehmenden Aktivität von parietal nach zentral-frontal in der jüngeren Probandengruppe (Tab. 13).

**Tabelle 13.** Normalisierte Amplitudenwerte (in  $\mu V$ ) der gemittelten parietalen (P3PzP4), zentralen (C3CzC4) und frontalen (F3FzF4) Elektroden in Abhängigkeit von der Aufgabe und dem Alter der Probanden

| Aufgabe                 | Alter | Elektrode         |                  |                 | p              |
|-------------------------|-------|-------------------|------------------|-----------------|----------------|
|                         |       | parietal (P3PzP4) | zentral (C3CzC4) | frontal(F3FzF4) |                |
| <i>Sternberg-(sim.)</i> | jung  | <b>.68</b>        | <b>.39</b>       | <b>.35</b>      | <b>&lt;.05</b> |
|                         | alt   | <b>.55</b>        | <b>.20</b>       | <b>.38</b>      |                |
| <i>Stroop</i>           | jung  | <b>.72</b>        | <b>.51</b>       | <b>.48</b>      | <b>.08</b>     |
|                         | alt   | <b>.74</b>        | <b>.50</b>       | <b>.64</b>      |                |
| <i>Switch</i>           | jung  | <b>.66</b>        | <b>.42</b>       | <b>.38</b>      | <b>&lt;.05</b> |
|                         | alt   | <b>.55</b>        | <b>.40</b>       | <b>.48</b>      |                |

Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ .

In keiner der untersuchten Aufgaben ergab sich eine CR x Elektrode- bzw. eine CR x Elektrode x Alter-Interaktion. Des Weiteren zeigten weder der Testscore im Raven-Matrizen-Test noch der AOSPAN-Gesamtscore einen Zusammenhang zum Anterior-Shift der P3.

Die varianzanalytische Auswertung der Differenzscores (Tab. 14, vgl. Reuter et al., 2016) zwischen den normalisierten parietalen (P3PzP4) und frontalen (F3FzF4) Elektroden für die beiden Untersuchungszeitpunkte und Aufgabenbedingungen als Innersubjektfaktoren und



Alter sowie CR als Zwischensubjektfaktoren, ergaben für die *Switch-Aufgabe* (KF) sowohl einen signifikanten Haupteffekt des Alters ( $F(1,45) = 5.53$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2 = .11$ ) mit kleineren Differenzwerten für die ältere (.07  $\mu V$ ) im Vergleich zur jüngeren (.28  $\mu V$ ) Probandengruppe als auch einen Interaktionseffekt zwischen Alter und CR ( $F(1,45) = 3.90$ ,  $p = .05$ ,  $\eta^2 = .08$ ).

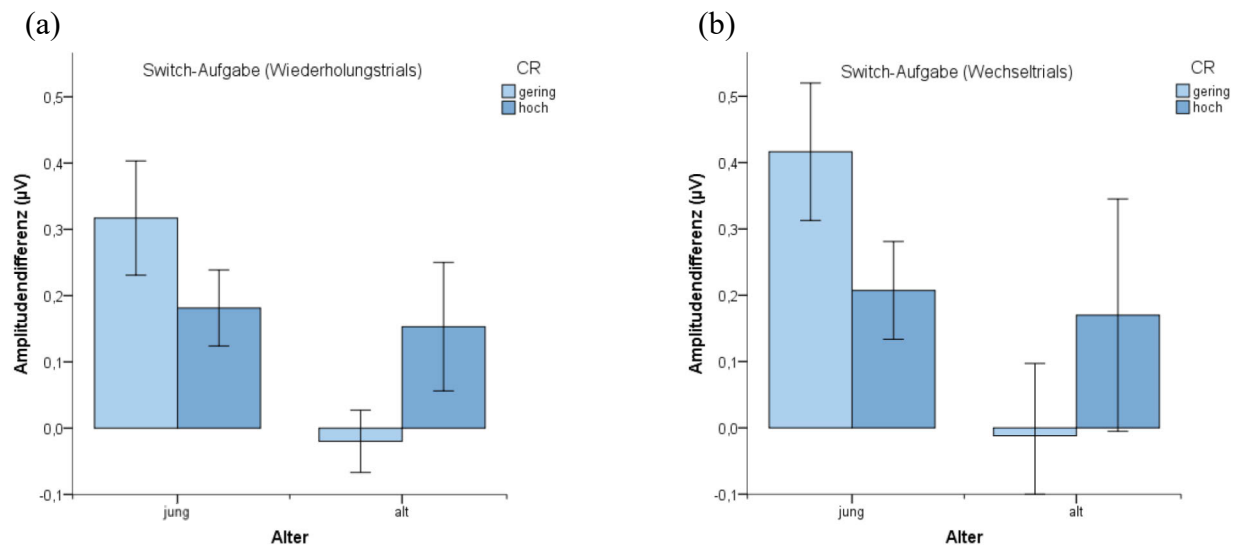
**Tabelle 14.** Mittlere P3-Amplitudendifferenz ( $M_d$ , in  $\mu V$ ) sowie Standardabweichungen (SD) zwischen den normalisierten gemittelten parietalen (P3PzP4) und frontalen (F3FzF4) Elektroden in Abhängigkeit von Aufgabe, kognitiver Reserve (CR) und dem Alter der Probanden

| Aufgabe                       | CR  | $M_d$ (SD)       |                   | $p$            |
|-------------------------------|-----|------------------|-------------------|----------------|
|                               |     | <i>jung</i>      | <i>alt</i>        |                |
| <i>0-back</i>                 | CR1 | .21 (.05)        | .17 (.05)         | n.s.           |
|                               | CR2 | .14 (.05)        | .10 (.07)         |                |
| <i>2-back</i>                 | CR1 | .10 (.06)        | .13 (.06)         | n.s.           |
|                               | CR2 | .04 (.05)        | .02 (.07)         |                |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | CR1 | .08 (.10)        | .02 (.10)         | n.s.           |
|                               | CR2 | .04 (.09)        | -.09 (.12)        |                |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | CR1 | .37 (.09)        | .21 (.09)         | n.s.           |
|                               | CR2 | .28 (.09)        | .13 (.12)         |                |
| <i>Stroop</i>                 | CR1 | .27 (.09)        | .03 (.08)         | n.s.           |
|                               | CR2 | .21 (.08)        | .16 (.13)         |                |
| <i>Switch</i>                 | CR1 | <b>.37 (.08)</b> | <b>-.02 (.08)</b> | <b>&lt;.05</b> |
|                               | CR2 | <b>.19 (.08)</b> | <b>.16 (.11)</b>  |                |

Nicht signifikant (n.s.)  $p > .1$ , marginal signifikant  $p < .1$ , statistisch signifikant  $p < .05$ .

Fett hervorgehoben sind Ergebnisse ab einer marginalen Signifikanz von  $p < .1$ . In Klammern gesetztes Signifikanzniveau gilt nur für die fett hervorgehobene Bedingung der jeweiligen Zeile.

In der Hoch-CR-Gruppe ergaben sich zwischen parietalen und frontalen Elektroden vergleichbare Differenzwerte für ältere wie für jüngere Probanden ( $F(1,21) = .66$ ,  $p = .8$ ,  $\eta^2 = .003$ , n.s.). In der Gering-CR-Gruppe war die Amplitudendifferenz für Jüngere mit einem ausgeprägten parietalen Maximum signifikant höher als für Ältere mit einem schwindend geringen Unterschied in der Amplitudenhöhe zwischen parietalen und frontalen Elektroden ( $F(1,24) = 10.02$ ,  $p < .01$ ,  $\eta^2 = .3$ , Abb. 25a, b).



**Abbildung 25 a, b.** Mittlere P3-Amplitudendifferenz (in µV) sowie Standardfehler zwischen den normalisierten gemittelten parietalen (P3PzP4) und frontalen (F3FzF4) Elektroden in der Switch-Aufgabe in Abhängigkeit von kognitiver Reserve (CR), dem Alter der Probanden und der Aufgabenbedingung ((a) Wiederholungs- vs. (b) Wechseltrials)

## Zwischenfazit

Die Annahme, dass die kognitive Reserve in einem Zusammenhang zum Anterior-Shift der P3 steht, kann weder verworfen noch bestätigt werden.

Insgesamt war die Zunahme frontaler P3-Amplituden bei älteren Probanden in je einer Aufgabe pro untersuchter exekutiver Leistung zu konstatieren (*AG: Sternberg-(sim.)*, *IH: Stroop*, *KF: Switch*), stand jedoch in zwei von den drei Aufgaben nicht mit der CR im Zusammenhang.

In der Aufgabe zur kognitiven Flexibilität (*Switch-Aufgabe*) zeigten Gering-CR-Jüngere eine deutliche Differenz zwischen hohen parietalen und geringen frontalen P3-Amplituden, während bei Gering-CR-Älteren kein Unterschied in der Amplitudenhöhe zwischen parietalen und frontalen Elektroden zu beobachten war. Hoch-CR-Probanden unterschieden sich hingegen nicht zwischen den Altersgruppen.

## 7 Diskussion

Das Ziel der Untersuchung war die Beurteilung der Rolle der kognitiven Reserve im mittleren und hohen Berufsalter im Zusammenhang mit kognitiver Leistung in exekutiven Funktionen sowie Parametern der P3-Komponente ereigniskorrelierter Potentiale des EEG als potentiell Biomarker für CR-assoziierte elektrophysiologische Informationsverarbeitungsprozesse.

Die wesentlichen Annahmen der Untersuchung konnten bestätigt werden. Hoch-CR-Probanden waren kognitiv leistungsfähiger im Vergleich zu Gering-CR-Probanden mit insgesamt schnelleren Reaktionen und insbesondere geringeren Fehlerraten sowie einer höheren AG-Kapazität. Tendenziell waren in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen und bei älteren Probanden im Falle einer geringen CR, schlechtere Leistungsdaten zu verzeichnen. Zudem reduzierte sich die AG-Kapazität älterer Gering-CR-Probanden nach einem 2-Jahres-Intervall geringfügig, während ältere Hoch-CR-Probanden ihre Leistung steigern konnten. Die P3-Amplitude variierte bedingungsunabhängig systematisch in Abhängigkeit von CR und Alter über mehrere Aufgaben hinweg und war bei jüngeren Hoch-CR-Probanden höher und bei älteren Hoch-CR-Probanden geringer ausgeprägt im Vergleich zu altersgleichen Gering-CR-Gruppen. Die neuronale Reizverarbeitungsgeschwindigkeit war altersunabhängig bei Hoch-CR-Probanden in fünf von sechs Aufgaben höher, wenngleich hypothesenkonträr tendenziell in einfacheren Aufgabenbedingungen von kürzerer Latenz. In der Aufgabe zur kognitiven Flexibilität zeigte die CR eine Assoziation zum Anterior-Shift der P3.

Die nachfolgende Diskussion der Ergebnisse erfolgt zunächst separat für die Leistungs- und elektrophysiologischen Daten. Es folgt eine zusammenfassende Diskussion wesentlicher Befunde unter Herausarbeitung der praktischen Relevanz. Eine Beurteilung der Limitationen und Stärken der Untersuchung sowie ein kurzer Ausblick für die künftige Forschung schließen das Diskussionskapitel ab.

### *Leistungssdaten*

Über den Einfluss der CR auf die Leistung in den drei Domänen der exekutiven Funktionen (AG, KF und IH) wurde angenommen, dass eine hohe CR mit kürzeren Reaktionszeiten und geringeren Fehlerraten im Zusammenhang steht (Hyp. 1a), in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen (Hyp. 1b) und in der älteren Probandengruppe (Hyp. 1c) mit einem

größeren Leistungsunterschied zwischen CR-Gruppen assoziiert ist und mit einer Leistungsverbesserung in der Wiederholungstestung (Hyp. 1d) einhergeht.

Durch aufgabenübergreifend kürzere Reaktionszeiten und geringere Fehlerraten (Reaktionszeit-, Fehlerindex) zeigten sich Probanden mit einer hohen CR erwartungskonform signifikant leistungsfähiger in Aufgaben zu exekutiven Funktionen als solche mit einer geringen CR (Amoretti et al., 2016; Speer & Soldan, 2015). Schnellere Reaktionen waren deskriptiv domänenübergreifend zu verzeichnen, wenngleich nicht jede Aufgabe die Signifikanzschwelle erreichte. Die Plausibilität der Ergebnisse ist dennoch einerseits durch die Replikation über mehrere Aufgaben und andererseits durch die Ergebnisreproduktion im Rahmen der Wiederholungstestung gegeben. In der Erstuntersuchung marginal signifikante Effekte der CR (v.a. Hyp. 1a, Hyp. 1b) erreichten oftmals aufgaben- und domänenübergreifend zum zweiten Untersuchungszeitpunkt die Signifikanzschwelle. Der Leistungsvorteil einer hohen CR war in den Fehlerraten noch deutlicher zu sehen, wo lediglich in zwei Aufgaben kein signifikanter Gruppenunterschied konstatiert werden konnte. Die beiden Aufgaben zeichneten sich durch sehr geringe Fehlerraten aus. Der Deckeneffekt in der 0-back-Aufgabe ist auf die Leichtigkeit der Aufgabenanforderung durch fehlende AG-Belastung (vgl. Schapkin, 2012) zurückzuführen. In der Inhibitionskontrollleistung erfasst über die Stroop-Aufgabe könnte das Reaktionsfenster von 3000 ms zu lang gewesen sein.

Die Stroop-Aufgabe differenzierte im Vergleich zu Aufgaben zum AG und mentaler Flexibilität insgesamt am wenigsten in Abhängigkeit von der CR. Die aktuelle Konzeption der Stroop-Aufgabe könnte aufgrund der geringen Fehlerrate nicht geeignet gewesen sein, um Gruppenunterschiede in der Akkuratheit der Aufgabenbewältigung aufzudecken. Zugleich konnte übereinstimmend mit der Hypothese 1b gezeigt werden, dass es Hoch-CR-Probanden im Schnitt schneller gelingt, den dominanten Prozess der Lesetätigkeit bei inkongruenten Trials der Stroop-Aufgabe zu unterdrücken und den nicht automatisierten Pfad der Schriftfarbenbenennung zu aktivieren, sodass auch für die Fähigkeit zur Inhibitionskontrolle eine Sensitivität gegenüber der CR zu bestehen scheint.

Weiterhin profitierten Probanden mit einer hohen CR in allen AG-Aufgaben stärker in den fehlerträchtigen im Vergleich zu den einfachen Aufgabenbedingungen, indem sie bei vergleichbarer Reaktionsgeschwindigkeit deutlich weniger Fehlreaktionen zeigten. Mit steigendem Inter-Target-Intervall bzw. Memory-Set stiegen AG-Belastung und Aufmerksamkeitsanforderung (McEvoy, Pellouchoud, Smith & Gevins, 1998) und beeinträchtigten die Leistung in der Gering-CR-Gruppe durch unzureichend vorhandene

Ressourcenkapazität (Wickens, Sandry & Vidulich, 1983). Somit kann die Hypothese 1b im Ansatz bestätigt werden.

Im Einklang mit vorausgegangenen Untersuchungen (z. B. Missonnier et al., 2004) zeigten ältere Probanden zu beiden Untersuchungszeitpunkten aufgabenübergreifend (Reaktionszeitindex) signifikant längere Reaktionszeiten im Vergleich zu der jüngeren Probandengruppe. Die CR beeinflusste diesen Zusammenhang entgegen der Hypothese 1c nicht, weshalb davon ausgegangen wird, dass eine hohe CR zwar insgesamt mit schnelleren Reaktionen einhergeht (Hyp. 1a), jedoch in der untersuchten Altersgruppe (noch) keinen zusätzlichen Vorteil für die Reaktionsgeschwindigkeit mit zunehmendem Alter bietet. Die kumulierte Häufigkeit der aggregierten Reaktionszeiten in der 2-back- (AG) und der Switch-Aufgabe (KF) mit einem hohen Anteil sehr schneller Reaktionen bei den Hoch-CR-Älteren schließt eine teils strategische Reaktionszeitanpassung nicht aus (Smith & Brewer, 1995). So scheinen Hoch-CR-Ältere im Berufsalter nicht durchgehend langsamer als jüngere Probanden zu sein.

Im Gegensatz zur reduzierten mittleren Reaktionsgeschwindigkeit waren ältere Probanden insgesamt nicht weniger akkurat in ihren Reaktionen (Fehlerindex) als Jüngere (Pelosi & Blumhardt, 1999; Salthouse, 1979; Smith & Brewer, 1995), was zunächst der allgemeinen Feststellung entspricht, Ältere aufgrund des sog. Geschwindigkeits-Genauigkeits-Austausches im Arbeitsleben bevorzugt dort einzusetzen, „wo es auf Präzision und Fehlerfreiheit ankommt, und weniger auf Geschwindigkeit“ (Wild-Wall, Gajewski & Falkenstein, 2009, S. 302). Bei altersgruppenhomogener Datenanalyse zeigte sich jedoch ein CR-abhängiger Leistungsunterschied. Während zwischen den beiden jüngeren Gruppen lediglich deskriptiv ein leicht erhöhter Fehlerwert bei geringer CR zu beobachten war, war die durchschnittliche Fehlerrate unter älteren Probanden bei geringer CR signifikant und um mehr als das Doppelte erhöht (19.6 vs. 8.6). Auf Aufgabenebene zeigte sich in mehreren Aufgaben zum AG und KF eine statistische Tendenz zur höheren Fehlerrate älterer Gering-CR-Probanden ebenso wie signifikant mehr Fehlreaktionen in der anspruchsvollen Aufgabenbedingung der 2-back-Aufgabe (AG). Die in der Literatur berichtete höhere Leistungsvariabilität mit steigendem Lebensalter (u. a. Schmitt et al., 2014) kann den aktuellen Ergebnissen zufolge zu einem Teil auf die unterschiedlich hohe Ausprägung der CR zurückzuführen sein (Wild-Wall et al., 2009).

Ein weiterer Befund ist die zu beiden Untersuchungszeitpunkten signifikant höhere AG-Kapazitätsleistung (AOSPAN) bei hoher CR, deren Änderung im Alterungsprozess von

einigen Autoren als die zentrale Determinante für die altersbedingte kognitive Leistungsabnahme angesehen wird (Reuter-Lorenz & Sylvester, 2005, S.186).

Hoch-CR-Jüngere zeigten in der AOSPAN-Aufgabe zu beiden Testzeitpunkten ein konstantes hohes Leistungsniveau. Gering-CR-Jüngere erreichten zu t1 eine geringere Leistung, konnten sie jedoch zu t2 numerisch merklich, wenngleich nicht signifikant, verbessern. Auch ältere Probanden hatten in Abhängigkeit von der CR ein unterschiedliches Leistungsausgangsniveau (vgl. Hyp. 1a). Bei besserer Ausgangsleistung schafften es Hoch-CR-Ältere, ihre Leistung nach zwei Jahren deutlich zu steigern. Älteren Probanden mit geringer CR hingegen, standen im Gegensatz zu den Gering-CR-Jüngeren u. a. aufgrund des höheren Alters und zugleich geringer CR kaum Kompensationsmöglichkeiten gegenüber den abnehmenden kognitiven Ressourcen zur Verfügung. Sie erreichten eine Kapazitätsgrenze (Daffner et al., 2011) und konnten von der Retest-Situation nicht profitieren. Es gibt robuste empirische Evidenz für kognitive Plastizität bis ins hohe Alter (Nyberg, 2005; Baltes & Kliegl, 1988), dennoch profitieren Jüngere wiederholt stärker von kognitiven Trainingsprogrammen und Retest-Situationen als ältere Studienteilnehmer, sodass die Leistungsunterschiede aufgrund im Alter nachlassender Lernfähigkeit auch nach intensivem Training im Posttest generell größer ausfallen als im Pretest (Baltes & Kliegl, 1988; Nyberg, 2005; Fratiglioni & Wang, 2007). Zugleich legen insbesondere tierexperimentelle Untersuchungen auch im Erwachsenenalter eine hohe Beeinflussbarkeit der kognitiven Plastizität durch stimulierende Umweltfaktoren nahe (nach Scarmeas & Stern, 2003), deren Gesamtheit eine hohe Überschneidung zur CR zeigt. Praktische Implikationen, die sich aus diesem Befund ergeben, werden im übernächsten Diskussionsabschnitt diskutiert.

Im Hinblick auf die Hypothese 1d wurde dem Matthäus-Effekt (Merton, 1968) zufolge und entsprechend den Untersuchungsbefunden mit leistungssteigernden Retest-Effekten bis zu fünf Jahre nach der Ersttestung, eine Zunahme der Leistungsdifferenz zwischen den beiden CR-Gruppen erwartet (Abrams, 2009; Rönnlund, Nyberg, Bäckman & Nilsson, 2005). Insgesamt konnte vom ersten zum zweiten Testzeitpunkt zwar eine globale Reaktionszeitabnahme, als ein allgemein leistungssteigernder und durch die Gewöhnung an die Testsituation bedingter Retest-Effekt konstatiert werden, diese war jedoch unabhängig von der CR. Deskriptiv deutete sich für die Hoch-CR-Gruppe in vier Aufgaben eine stärker ausgeprägte Reaktionszeitverkürzung zum zweiten Testzeitpunkt an, diese blieb jedoch statistisch nicht signifikant. Entgegen der Hypothese zeigte die Gruppe mit der geringen CR in der Sternberg-(sukz.)Aufgabe (AG) vom ersten zum zweiten Zeitpunkt eine signifikante Reaktionszeitreduktion um 47 ms und erreichte damit die mittlere Reaktionsgeschwindigkeit

der Hoch-CR-Gruppe (CR1 = 768 ms vs. CR2 = 770 ms). Zugleich blieb die mittlere Fehlerrate über die zwei Jahre konstant und etwa doppelt so hoch im Vergleich zur Hoch-CR-Gruppe (46 vs. 25). Trotz der Verkürzung in der Reaktionszeit gelang es der Gering-CR-Gruppe somit nicht, ihre AG-Leistung zu verbessern.

In den Fehlerraten ergaben sich keine zeitpunktabhängigen Veränderungen. Der Trend zu einer zu t2 reduzierten Fehlerrate bei geringer CR in der Stroop-Aufgabe (IH) ist aufgrund der insgesamt zu geringen Fehlerquote (< 5%) nicht sinnvoll interpretierbar.

Die AG-Kapazitätsscores zeigten ähnlich der Reaktionszeit einen Trend zu besserer Leistung bei der Wiederholungstestung. Ein Zusammenhang zur CR bestand aufgrund des zuvor berichteten altersabhängigen Effektes (Hypothese 1c) nicht.

Aufgrund fehlender Interaktionseffekte zwischen der CR und dem Untersuchungszeitpunkt kann die Replikation der Ausgangsbefunde als erfolgt angesehen werden.

Es lässt sich festhalten, dass eine hohe CR zu beiden Zeitpunkten mit kürzeren Reaktionszeiten, aber vor allem mit geringeren Fehlerraten und einer deutlich besseren AG-Kapazitätsleistung einherging. Insgesamt zeigte die CR einen differentiellen Effekt in Abhängigkeit vom untersuchten Leistungsparameter, Aufgabe und Alter. Ältere profitierten in mehreren Aufgaben stärker von einer hohen CR als Jüngere, jedoch nicht in der Reaktionsgeschwindigkeit, sondern vielmehr in der Reaktionsgenauigkeit und vermutlich stärker in anspruchsvollen Aufgabenbedingungen (vgl. 2-back-Aufgabe (AG)).

Entsprechend Siedlecki et al. (2009) kann insgesamt geschlossen werden, dass die durch stimulierende Lebenserfahrungen aufgebaute CR erwartungsgemäß mit einer flexibleren Kognition einhergeht, die sich in verbesserter Leistung in exekutiven Aufgaben niederschlägt, die u. a. ihrerseits die Fähigkeit zur flexiblen Strategienutzung bei der Lösungssuche ermöglichen und theoretischen Ausführungen zufolge (Kap. 3.1) wesentlich für den Erhalt der meisten kognitiven Leistungen im Prozess des gesunden Alterns sind.

### *Elektrophysiologische Daten*

In vorausgegangenen Untersuchungen wurde die P3 als ein Biomarker für den normativen Alterungsprozess und Demenzerkrankungen diskutiert (Rossini et al., 2007, O'Connell et al., 2012), weshalb eine Assoziation zwischen Parametern der P3 und der CR plausibel erscheint. Es wurde angenommen, dass die P3-Amplitude als ein Maß für die Allokation kognitiver Ressourcen in die Aufgabenbearbeitung (Van Dinteren et al., 2014; Donchin & Coles, 1988) einen geeigneten Parameter darstellt, um den Unterschied in der Höhe der neuronalen

Effizienz (= geringere Ressourcenzuteilung bei geringer Aufgabenschwierigkeit) und der neuronalen Kapazität (= Ressourcenaktivierung bei hoher Aufgabenschwierigkeit) zwischen Probanden mit unterschiedlich hoher CR sichtbar zu machen (Hyp. 2a, Daffner et al., 2011). Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass Hoch-CR-Probanden eine schnellere mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit haben, die sich in kürzeren P3-Latenzen abbilden lässt und insbesondere in schweren Aufgabenbedingungen einen Geschwindigkeitsvorteil bietet (Hyp. 2b). Von den beschriebenen hypothetischen Zusammenhängen sollte vor allem die ältere Probandengruppe mit hoher CR profitieren (Hyp. 1c). Auch wurde die Replikation der Befunde nach zwei Jahren angestrebt (Hyp. 2d). Von Interesse war zuletzt ein eventueller Zusammenhang zwischen der CR und dem in der Literatur oft beschriebenen altersassoziierten Anterior-Shift der P3 (Hyp. 1e).

Erwartungsgemäß variierten bis auf eine Ausnahme die P3-Amplituden in Abhängigkeit von der Aufgabenbedingung und waren jeweils in Aufgabenbedingungen mit kürzeren Reaktionszeiten größer. Eine stärkere Investition mentaler Ressourcen ging somit mit schnelleren Reaktionen einher. Im Gegensatz zu den Reaktionszeiten stand jedoch die P3-Amplitude in keinem globalen Zusammenhang zur CR. Beim 2-Jahres-Follow-up zeigte sich ein Trend zu kleineren P3-Amplituden in der Sternberg-(sukz.)Aufgabe (AG) für die Hoch-CR-Gruppe, der bei zugleich signifikant geringerer Fehlerrate im Sinne einer effizienteren neuronalen Verarbeitung interpretiert werden könnte. Die in der Hypothese 2a postulierte Wechselwirkung zwischen der CR und Aufgabenbedingung für die P3-Amplitude bestand nicht. Auch deskriptiv fand sich kein Hinweis auf einen derartigen Zusammenhang. Der in der Switch-Aufgabe (KF) vorliegenden signifikanten Interaktion zwischen CR und Aufgabenbedingung lag ein in der Hoch-CR-Gruppe stärker als in der Gering-CR-Gruppe ausgeprägter und in der Literatur beschriebener Anstieg der P3-Amplitude auf Targets in den Wiederholungstrials (repeat) im Vergleich zu den Wechseltrials (switch) zugrunde (Schapkin, 2012; Karayanidis, Whitson, Heathcote & Michie, 2011; Kieffaber & Hetrick, 2005). Dieser bedingungsabhängige Unterschied war für beide CR-Gruppen gleichgerichtet. Inwiefern die Hoch-CR-Gruppe aufgrund einer höheren neuronalen Kapazität mit schneller und leichter verfügbaren kognitiven Ressourcen, höherer Motivation (Forstmeier & Maercker, 2010) oder erhöhter Aufmerksamkeitsprozesse eine ressourcenintensivere Bearbeitung bevorzugte, bleibt offen. Karayanidis et al. (2011) interpretieren die im Vergleich zu den Wiederholungstrials kleinere P3-Amplitude in den Wechseltrials als Ausdruck größerer Wechselkosten, die sich jedoch so weder in den Reaktionszeiten noch Fehlerraten widerspiegeln.



Im Gegensatz zu der P3-Amplitude ging eine hohe CR bis auf eine Aufgabe entweder bedingungsübergreifend oder in einer der beiden Aufgabenbedingungen mit einer schnelleren mentalen Verarbeitungsgeschwindigkeit einher. Das Ergebnis fügt sich in vorausgehende Befunde der negativen Korrelation zwischen mentaler Funktion und der P3-Latenz, ebenso wie kürzeren P3-Latenzen bei besserer Leistung in neuropsychologischen Aufmerksamkeits- und Gedächtnistests (Rossini et al., 2007). In der Stroop-Aufgabe (IH), die bei hoher CR in der inkongruenten Aufgabenbedingung mit signifikant kürzeren Reaktionszeiten assoziiert war, fehlte der Zusammenhang zwischen der CR und der P3-Latenz. Nicht auszuschließen ist eine teilweise Komponentenüberlagerung zwischen der P3- und anderen Komponenten der EKP, u. a. der N400, da Farbwörter und zu diesen konträre Farben eine semantische Inkongruenz auslösen können. Auch könnten der Stimulusevaluation nachgelagerte Informationsverarbeitungsprozesse, u. a. die Antwortselektion und motorische Prozesse, dem Reaktionszeitunterschied zwischen den CR-Gruppen zugrunde liegen.

Ähnlich den Reaktionszeiten in den meisten Aufgaben, konnten entgegen der Hypothese in den anspruchsvollen Aufgabenbedingungen keine kürzeren P3-Latenzen für die Hoch-CR-Gruppe verzeichnet werden. In zwei AG-Aufgaben (2-back, Sternberg-(sukz.)) war jedoch die hohe CR mit einem rascheren neuronalen Verarbeitungstempo in den jeweils einfachen Aufgabenbedingungen assoziiert, während Gering-CR-Probanden die Leichtigkeit der Anforderung nicht zu ihrem Vorteil nutzen konnten.

Ein angenommener Amplitudenunterschied je nach Aufgabenbedingung konnte auch unter Berücksichtigung des Alters der Probanden für die unterschiedlich hohe CR nicht gefunden werden (Rypma et al., 2001). Die Aufgabenbedingung stand somit entgegen der Annahme weder global noch altersgruppenspezifisch in einer von der CR abhängigen Beziehung zur P3-Amplitude. Kein Effekt der Aufgabenbedingung auf die P3-Amplitude bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die CR die hypothetisch angenommenen neuronalen Prozesse nicht beeinflusst. Die EKP decken nur einen bestimmten Teil der hirnelektrischen Aktivität ab, so kann es mitunter sein, dass entweder die Methode nicht geeignet ist, um derartige Beziehungen aufzudecken (Robertson, 2014; Poil et al., 2013) oder sich der vorhandene Unterschied in Abhängigkeit von der Aufgabenbedingung in anderen Komponenten der EKP als der P3 niederschlagen könnte (vgl. Fabiani et al., 2007; Moreno et al., 2014; Buckner, 2005, S.295).

Interessanterweise ergaben sich innerhalb der jeweiligen Altersgruppen entgegen dem Vorbefund einer fehlenden Interaktion zwischen der CR und dem Alter in einer Sternberg-Aufgabe für die P3-Amplitude (Speer & Soldan, 2015) in nahezu jeder Aufgabe

Amplitudenunterschiede je nach Ausprägung der CR und dem Alter. Der Unterschied zum Befund von Speer und Soldan (2015) könnte sowohl durch die unterschiedliche Operationalisierung der CR (verbale Intelligenz und Schulbildung) als auch den unterschiedlichen Zugang zur Erfassung der P3-Amplitude bedingt sein.

Der Aufgabenleistung zugrunde liegende neuronale Prozesse waren für beide Altersgruppen verschieden (Rypma & D'Esposito, 2000; Grady, 2002). In zwei Aufgaben zeigten jüngere Hoch-CR-Probanden eine stärker ausgeprägte P3 im Vergleich zu Gleichaltrigen in der Gering-CR-Gruppe (Switch- (Wiederholungstrials, t1, KF), 2-back-Aufgabe (AG)). Numerisch lagen bis auf wenige Ausnahmen die Amplitudenwerte auch in den restlichen Aufgaben bei jüngeren Probanden mit hoher CR höher als bei geringer CR. In der älteren Probandengruppe hingegen ließ sich ein entgegengesetzter Trend beobachten. Hoch-CR-Ältere zeigten in der überwiegenden Anzahl der Aufgaben kleinere P3-Amplituden im Vergleich zur geringen CR (0-back-, Sternberg-(sim. und sukz.)- (AG), Stroop-Aufgabe (IH)), auch in der 2-back-Aufgabe (AG) entsprachen die Werte numerisch derselben Tendenz. Die Zusammenhänge konnten darüber hinaus beim 2-Jahres-Follow-up vollständig repliziert werden.

Man könnte zunächst vermuten, dass ältere Hoch-CR-Probanden einen allgemein niederamplitudigen EKP-Verlauf zeigen. In bildgebenden Untersuchungen ist oftmals eine altersbedingte Abnahme in der Baseline der neuralen Aktivität beobachtet worden, die eine verringerte aufgabenbezogene metabolische Aktivität bei Älteren im Vergleich zu Jüngeren nahelegt (Gazzaley & D'Esposito, 2005). Inwieweit dieser Befund auf die Amplitude der P3-Komponente zu übertragen ist, kann nicht beantwortet werden. Aus theoretischer Sicht erscheint eine stärkere altersbedingte Aktivierungsreduktion in der Hoch-CR-Gruppe im Vergleich zu Älteren mit geringer CR als wenig wahrscheinlich. Dagegen spricht auch die augenscheinlich deutlich ausgeprägte vorausgehende P2-Komponente für die Hoch-CR-Älteren, ebenso zeigt sich für die Switch-Aufgabe eine numerisch höhere P3-Amplitude bei Hoch-CR-Älteren im Vergleich zu Gering-CR-Probanden gleichen Alters. Gleich hohe Amplituden in einer Aufgabe/Bedingung bzw. für eine EKP-Komponente zu finden, jedoch nicht für eine Weitere, spricht nicht für allgemein reduzierte EKP-Amplituden (vgl. Gazzaley & D'Esposito, 2005, S. 121).

Abnehmende P3-Amplituden bei älteren Probanden gelten in der Literatur zumeist als Ausdruck des kognitiven Alterns: „The delayed parietal P3 with a decreased amplitude in older adults has been interpreted as evidence of cognitive decline due to neural decrements in posterior brain regions“ (Saliassi, Geerligs, Lorist & Maurits, 2013, S. 8). Zwar nimmt die

Amplitude der untersuchten P3-Komponente auf Targetstimuli regulär im Entwicklungsverlauf bereits ab dem dritten Jahrzehnt linear ab (Van Dinteren et al., 2014; Mott, Alperin, Holcomb & Daffner, 2014), inwiefern jedoch diese altersbedingte Abnahme kognitive Funktionen reflektiert, ist nicht endgültig geklärt und sollte immer in Bezug zur Leistung betrachtet werden (Di, Rypma & Biswal, 2014). Es ist nicht ausgeschlossen, dass der zumeist korrelative Zusammenhang zwischen kognitiver Leistung und einer bestimmten neuronalen Veränderung durch eine Drittvariable beeinflusst sein kann (Steffener & Stern, 2012; Di et al., 2014). Sollte jedoch eine verminderte P3-Amplitude der körperlich und geistig gesunden Hoch-CR-Probanden im Berufsalter neuronale und kognitive altersbedingte Abbauerscheinungen widerspiegeln (vgl. u. a. Reuter, Voelcker-Rehage, Vieluf, Winneke & Godde, 2013), stellt sich die Frage nach der fehlenden Manifestation dieser bei den deutlich leistungsschwächeren Gering-CR-Älteren (vgl. Brain-Maintenance-Konzept, Nyberg, Lövdén, Riklund, Lindenberger & Bäckman, 2012). Steffener & Stern (2012) beobachteten zudem, dass Ältere mit hoher CR mehr Pathologie im primären Netzwerk tolerieren können, bevor der Einsatz eines sekundären Netzwerkes zur Leistungskompensation nötig ist (Tucker & Stern, 2012). Sollte die kleinere P3-Amplitude der Hoch-CR-Älteren die Manifestation erfolgreicher Kompensationsmechanismen sein, müsste davon ausgegangen werden, dass primäre prozessspezifische Netzwerke ihre Funktion nicht mehr erfüllen können und sekundäre Mechanismen greifen, um diese Schäden zu minimieren. Zugleich würden den Gering-CR-Älteren diese kompensatorischen Ressourcen fehlen. Tatsächlich gibt es Befunde, die eine abnehmende posteriore Aktivierung im Zusammenhang mit besserer Leistung feststellen konnten, jedoch nur, wenn zugleich eine erhöhte kompensatorische frontale Aktivierung zu beobachten war (nach Saliasi et al., 2013). Übereinstimmend zur Studie von Saliasi et al. (2013) zeigten sich in der vorliegenden Untersuchung bei leistungsstärkeren älteren Probanden kleinere P3-Amplituden, ohne jedoch an größere frontale Amplituden gebunden zu sein. Eine erhöhte frontale P3-Amplitude war bei älteren Probanden zu beiden Untersuchungszeiten (vgl. Switch-Aufgabe (KF), Hyp. 2e) eher mit einer schlechteren Leistung assoziiert.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit für die Amplitudenreduktion wäre, die durch die klassische Mittelungstechnik zur Extraktion der EKP aus dem EEG nicht berücksichtigte und möglicherweise höhere intraindividuelle Latenzvariabilität der P3-Komponente bei den Hoch-CR-Älteren. „Age and disease may not only diminish ERP amplitudes but may also increase variability of ERP latencies and reaction times“ (Ouyang, Sommer & Zhou, 2015, S. 855). So kann beispielsweise eine Amplitudenreduktion auf tatsächlich kleine Amplituden, aber unter

Umständen auch auf eine hohe intraindividuelle Latenzvariabilität oder teilweise fehlende P3 in einzelnen Trials (z. B. durch mangelnde Aufmerksamkeit) zurückzuführen sein (Roth, 2007). Die aufgabenübergreifend hohe Leistung der Hoch-CR-Älteren spricht eher nicht für diese Annahme, denn Bellgrove, Hester und Garavan (2014) konnten bei gesunden Erwachsenen in einer Inhibitionskontrollaufgabe feststellen, dass eine hohe intraindividuelle Reaktionsvariabilität die Leistung reduziert und mit einer höheren Aktivierung für Inhibitionsprozesse relevanter Gehirnregionen, u.a. frontaler Regionen, einhergeht. Eine daraus geschlussfolgerte höhere Notwendigkeit der exekutiven Top-down-Kontrolle und eine verringerte Effizienz exekutiver Kontrollprozesse widersprechen den oben im Text erläuterten theoretischen Annahmen der CR-Hypothese zur Notwendigkeit einer kompensatorischen Reaktion bei gesunden, leistungsfähigen Hoch-CR-Probanden. Insgesamt werden eine höhere Reaktionszeit- und Latenzvariabilität eher im Zusammenhang mit pathologischen Prozessen und schlechterer Leistung gesehen (Bellgrove et al., 2014; Roth, 2007).

Gegen die Kompensationsinterpretation in der vorliegenden Untersuchung spricht, dass sowohl jüngere als auch ältere Probanden in Abhängigkeit von der CR eine unterschiedlich hohe Ressourcenaufwendung im Sinne der P3-Amplitude im Vergleich zu Gleichaltrigen zeigen, d.h. in beiden Altersgruppen die neuronalen Mechanismen durch die CR modifiziert werden. In der Literatur gibt es durchaus weitere Befunde unter Einbezug bildgebender Verfahren, in denen schnellere Reaktionszeiten in einer AG-Aufgabe in beiden Altersgruppen mit jeweils entgegengesetzter Aktivierungsrichtung im PFC einhergingen (Rypma & D'Esposito, 2000; Grady, 2002). Die Befunde sind aufgrund unterschiedlicher Methoden nicht direkt vergleichbar, aber es zeigt sich in der vorliegenden Untersuchung ein ähnliches Muster wie bereits aus fMRT-Experimenten bekannt, dass leistungsschwache ältere Probanden eine den leistungsstarken jüngeren Probanden vergleichbare neuronale Aktivität aufweisen (Buckner, 2005, S.276). So wäre es zwar möglich, dass altersbedingte Gehirnveränderungen kompensatorische Verarbeitungsmechanismen erforderlich machen, denkbar wäre aber auch ein allgemeiner altersbedingter Strategiewechsel in der Informationsverarbeitung, der die Amplitudenunterschiede mitbedingt (vgl. Grady, 2005, S. 300). So könnte sich die CR bei jüngeren Probanden in einer höheren neuronalen Kapazität äußern (Stern, 2009; Stern et al., 2012) und im Vergleich zu Gering-CR-Jüngeren höhere P3-Amplituden bewirken – eine Strategie, die zwar wenig effizient in der Zuteilung neuronaler Ressourcen wäre, jedoch bei einer großen Ressourcenmenge und -investition eine gute Leistung sichert. Ähnlich den Hoch-CR-Jüngeren zeigen Kinder im Oddball-Paradigma eine Assoziation zwischen einer geringen Fehlerrate und hohen P3-Amplituden, „reflecting more

available and more allocated resources“ (Van Dinteren et al., 2014, S. 9). Ähnliche Befunde findet man auch bei leistungsstarken Erwachsenen (Wronka, Kaiser & Coenen, 2013). Hinzu könnte auch eine unterschiedlich wahrgenommene Aufgabenschwierigkeit zwischen den beiden jüngeren Probandengruppen kommen, die sich in kleineren P3-Amplituden bei Gering- im Vergleich zu Hoch-CR-Jüngeren niederschlägt (Zurrón et al., 2014; Gajewski & Falkenstein, 2013). Eine höhere Motivation und Ehrgeiz der Hoch-CR-Jüngeren wären ebenfalls plausible, mit hoher CR eingehende Variablen, die nicht nur die Leistung, sondern auch die P3-Amplituden erhöhen können (Kleih, Nijboer, Halder & Kübler, 2010; Carrilo-de-la-Pena & Cadaveira, 2000).

Bei älteren Hoch-CR-Probanden hingegen könnte sich die CR immer mehr in einer größeren neuronalen Effizienz statt Kapazität der Ressourcenzuteilung niederschlagen und damit in kleineren P3-Amplituden im Vergleich zu Gering-CR-Älteren. Die P3-Amplitude wird insgesamt kleiner, wenn der zu verarbeitende Stimulus leicht zu detektieren ist (z.B. laut statt leise) oder bei wiederholter Stimuluspräsentation eine Habituation eintritt und zunehmend weniger Verarbeitungsressourcen benötigt werden (Van Dinteren et al., 2014). Die P3-Amplitude nimmt ebenfalls mit zunehmendem Trainingsfortschritt ab als Ausdruck abnehmender exekutiver Kontrolle im Zuge stärkerer Automatisierung der Abläufe (Frömer, Stürmer & Sommer, 2016; Schapkin, 2012). So scheinen angesichts ihrer guten Leistung Hoch-CR-Ältere nur so viele kognitive Ressourcen zu investieren, wie für eine gute Aufgabenbewältigung benötigt werden, ohne sich dabei kognitiv und physiologisch unnötig zu verausgaben. „A more efficient brain may not have the need to substantially recruit its cognitive capacity, if a task can be successfully performed with only a part of the available resources“ (Van Dinteren et al., 2014, S. 9). Ältere Gering-CR-Probanden investieren gemessen an der relativ hohen P3-Amplitude relativ viele mentale und neuronale Ressourcen in die Aufgabenbearbeitung, ohne dass diese Investition ihre Leistung auf einem den Jüngeren oder den Hoch-CR-Älteren vergleichbarem Niveau halten kann. Unterstützung findet diese Interpretation in einer Untersuchung unter Verwendung der Magnetoenzephalographie (López et al., 2014). In einer modifizierten Sternberg-Aufgabe aktivierten Gering-CR-Probanden die funktionalen Gehirnnetzwerke deutlich stärker, ohne dass sich die energieaufwändigere Verarbeitung in einer besseren Leistung niederschlug (vgl. auch Reed et al., 2010; Barulli & Stern, 2013).

Es wäre nicht uninteressant zu erforschen, ob und inwiefern sich die bevorzugte Wirkweise der CR über Entwicklungsstufen hinweg systematisch verändern könnte (z. B. Kapazität im

Jugendalter – Effizienz im mittleren Alter – Kompensation im hohen Alter bzw. bei Unfall oder Krankheit).

Die P3-Latenzen, als ein Index für die Schnelligkeit und Effektivität neuronaler Prozesse (Van Dinteren et al., 2014), waren entsprechend der Hypothese 2b bei Hoch-CR- im Vergleich zu Gering-CR-Probanden kürzer. Es konnte kein verstärkter Einfluss der CR für Ältere im Vergleich zu Jüngeren nachgewiesen werden (Hyp. 2c).

In Bezugnahme auf die Hypothese 2d war der Follow-up-Zeitpunkt nach zwei Jahren für die Feststellung der typischerweise altersassoziierten P3-Latenzverzögerung zu kurz (Van Dinteren et al., 2014). So zeigte sich von der CR unabhängig nur in der Stroop-Aufgabe (IH) eine Latenzzunahme in der älteren Probandengruppe (Zurrón et al., 2014).

Die zum ersten Untersuchungszeitpunkt beobachteten Effekte der CR konnten nach zwei Jahren nahezu vollständig repliziert werden, was Zufallsbefunde zu beiden Testzeitpunkten unwahrscheinlich macht.

Neben der oft beobachteten altersassoziierten Abnahme der P3-Amplitude und Zunahme der P3-Latenz (u. a. McEvoy et al., 2001) gehört der Anterior-Shift der P3-Komponente zu den robusten Befunden der neurokognitiven Altersforschung. Ältere rekrutieren in einer Vielzahl an kognitiven Aufgaben vergleichsweise mehr frontale statt parietale Ressourcen (McEvoy et al., 2001; O’Connell et al., 2012; Alperin, Mott, Rentz, Holcomb & Daffner, 2014; Kopp, Lange, Howe & Wessel, 2014; Reuter et al., 2016). Der Anterior-Shift der P3 wird vermutlich durch den PFC mediert (Van Dinteren et al., 2014), der in bildgebenden Studien von älteren Probanden verstärkt während der Aufgabenbearbeitung rekrutiert wird. Die Befundlage zum Zusammenhang zwischen Leistungsvariablen und dem Anterior-Shift der P3 ist konträr. Ein Zusammenspiel mit der CR, die in enger Beziehung zur kognitiv-neuronalen Plastizität steht, wäre denkbar (Hypothese 2e), denn: „The role of prefrontal cortex is not yet well-understood but its versatility suggests that it probably supports a number of plasticity-related processes associated with training-related performance improvements“ (Di et al., 2014, S. 46). Entsprechend zahlreichen vorausgegangenen Untersuchungen zeigten ältere Probanden in drei Aufgaben (Sternberg-(sim.) (AG), Stroop- (IH), Switch-Aufgabe (KF)) einen Anterior-Shift mit höheren frontalen P3-Amplituden im Vergleich zu jüngeren Probanden. In der Aufgabe zur kognitiven Flexibilität (Switch-Aufgabe (KF)) stand die Differenz zwischen parietalen und frontalen Amplituden im signifikanten Zusammenhang zur CR. In der Gering-CR-Gruppe zeigten jüngere Probanden ein klares parietales Maximum der P3-Amplitude, während Ältere zur Aufgabenbewältigung verstärkt auf frontale Ressourcen zurückgriffen, was in einem nahezu fehlenden Unterschied zwischen parietalen und frontalen

Amplitudenhöhen resultierte. In der Hoch-CR-Gruppe unterschieden sich hingegen Ältere kaum von den jüngeren Probanden. Die mittleren Amplitudendifferenzwerte zwischen parietalen und frontalen Elektroden waren im Vergleich zu Gering-CR-Jüngeren für beide Hoch-CR-Altersgruppen etwa halb so hoch.

Entsprechend anderen Autoren (O'Connell et al., 2012; Kopp et al., 2014) kann die beobachtete Ressourcenumverteilung der Gering-CR-Älteren eine kompensatorisch „zunehmende Aktivierung des Frontalhirns ... als Korrelat erhöhter Anstrengung und exekutiver Kontrolle“ (Schapkin, 2012, S.70; Cabeza, 2002; Reuter et al., 2013) durch verstärkte Nutzung frontaler Ressourcen darstellen. Die vermehrte Rekrutierung frontaler Areale resultierte jedoch nicht in besserer Leistung, weshalb auch die Alternativinterpretation einer altersbedingten Degeneration, u. a. durch einen Verlust inhibitorischer Mechanismen, Defizite in der Neurotransmission und anderweitige Schädigung des primären aufgabenrelevanten Netzwerkes (Seidler et al., 2010; Steffener & Stern, 2012; Schmitt et al., 2014) und daraus folgender neuraler Dedifferenzierung (Walhovd et al., 2006; Logan et al., 2002) nicht auszuschließen wäre (Reuter et al., 2016). So berichteten West et al. (2010) für ältere Probanden mit geringen exekutiven Leistungen über einen Anterior-Shift der P3 durch das Auslösen der Novelty-P3 sowohl auf neuartige als auch auf Oddball-Stimuli, während ältere Probanden mit hohen exekutiven Funktionen nur auf Oddball-Stimuli mit der Novelty-P3 reagierten und somit keinen Habituationsdefizit aufwiesen. Es ist nicht gänzlich richtig, allein anhand der Aufgabenleistung über eine Unterstützung der Kompensations- vs. Dedifferenzierungshypothese zu entscheiden. Vermutlich sind beide Hypothesen anzunehmen, denn auch Schlaganfall- und AD-Patienten (Grady et al., 2003; Buckner, 2005, S.275) zeigen eine höhere Rekrutierung verschiedener kortikaler u. a. frontaler Regionen bei zugleich schlechterer kognitiver Leistung im Vergleich zu altersgleichen gesunden Probanden. Die zusätzliche Aktivierung ist somit die Folge eines neuronalen Degenerationsprozesses und einer Verringerung der Spezifität neuronaler Prozesse im Sinne der Dedifferenzierungshypothese (Grady, 2002). Wenn jedoch die Leistungsvariablen innerhalb der jeweiligen Patientengruppen untersucht werden, ist die höhere zusätzliche Rekrutierung frontaler Regionen mit einer besseren Leistung assoziiert, was wiederum die Kompensationshypothese unterstützt.

In der Hoch-CR-Gruppe unterschieden sich Ältere kaum von der jüngeren Probandengruppe. Numerisch fiel die Amplitudendifferenz für Hoch-CR-Jüngere in beiden Aufgabenbedingungen jedoch geringer aus als für Gering-CR-Jüngere, die das eindeutige parietale Amplitudenmaximum aufwiesen. Vermutlich investieren jüngere Probanden mit

hoher CR, ähnlich der Interpretation zur Hypothese 2c, aufgrund einer insgesamt höheren neuronalen Kapazität und mehr frei verfügbaren kognitiven Ressourcen stärker in die Aufgabenbearbeitung, was sowohl die Leistung, die vergleichsweise höheren P3-Amplituden als auch unter bestimmten Voraussetzungen den Rückgriff auf zusätzliche frontale Ressourcen erklären könnte. Wie bereits erwähnt, scheinen sowohl pathologische als auch trainings- und eigeninitiierte strategische Prozesse ähnliche Mechanismen der neuronalen Plastizität induzieren zu können (Di et al., 2014, Greenwood, 2007).

Ältere Hoch-CR-Probanden zeichnen sich hingegen im Vergleich zu älteren Gering-CR-Probanden auch bei der Betrachtung des Anterior-Shifts der P3 durch eine höhere neuronale Effizienz aus, die bei deutlich geringerer und damit sparsamer Zuhilfenahme frontaler Ressourcen für eine signifikant bessere Leistung vollkommen ausreicht.

### *Zusammenfassende Diskussion und praktische Relevanz*

Trotz des relativ jungen Probandenalters von < 65 Jahren erwies sich die CR in der vorliegenden klinisch gesunden Stichprobe als leistungsrelevant (vgl. Stern, 2009; Speer & Soldan, 2015) und beeinflusste replizierbar die neuronale Informationsverarbeitung, wenngleich altersspezifisch auf unterschiedliche Weise. Die Effekte waren marginal bis moderat, zeigten aber eine deutliche Robustheit über den Untersuchungszeitraum von zwei Jahren. Dass für die vorliegende relativ junge Stichprobe, sowohl im Hinblick auf die Leistung als auch auf neurophysiologische Prozesse, replizierbare CR-Effekte gefunden werden konnten, ist nicht selbstverständlich. So berichtet beispielsweise Grant et al. (2014) für Bilingualisten im Vergleich zu Monolingualisten robuste Vorteile in der exekutiven Kontrolle für Kinder (u. a. Bialystok, Martin & Viswanathan, 2005) und deutlich ältere Erwachsene (u. a. Bialystok et al., 2004, 2008), jedoch oftmals nicht oder stark abgeschwächt oder nur unter besonders fordernden Aufgabenbedingungen für junge Erwachsene (u. a. Bialystok et al., 2005; Costa et al., 2009). Die über mehrere exekutive Funktionen beobachtete positive Assoziation der CR mit Leistungsvariablen ist auch deshalb hervorzuheben, weil sich die untersuchte Stichprobe durch besonders hohe Gesundheit (Medikamentenfreiheit, kardio-vaskuläre sowie psychiatrisch-neurologische Gesundheit und Ausschluss chronischer Erkrankungen, siehe Anhang B) auszeichnete und im Vergleich zur repräsentativen Ausgangsstichprobe (CAPI) einen deutlich höheren durchschnittlichen Bildungsgrad aufwies (vgl. Methodik, Abschn. 5.3). Beides sind Faktoren, durch die der Zusammenhang zwischen aktivem Lebensstil und dem kognitiven Funktionsniveau



unterschätzt werden kann (Newson & Kemps, 2005). So beschrieben unter anderem Houx, Jolles und Vreeling (1993) einen Zusammenhang zwischen dem Bildungsgrad und der Leistung in der Stroop-Aufgabe, wo eine geringe Schulbildung die Assoziation zwischen dem Alter und der Stroop-Interferenz verstärkte. Auch Roe et al. (2008) fand eine Assoziation zwischen einem globalen kognitiven Funktionsscore und Bildung, jedoch nur in der Gruppe mit hoher, nicht aber geringer Beta-Amyloid-Deposition, sodass theorienkonform insbesondere (kognitive) Risikogruppen von einer hohen CR profitieren.

Es stellt sich dennoch die Frage, ob nicht eine hohe Bildung eine Konsequenz von hoher Intelligenz ist und eine initial bessere kognitive Ausstattung im Sinne umgekehrter Kausalität durch einschlägige Interessen und kognitive Erfolge automatisch den Aufbau der CR determiniert (Hultsch et al., 1999). Dafür spricht unter anderem eine negative Assoziation zwischen kindlichen mentalen Fähigkeiten und späterer Demenzentwicklung (u. a. Whalley et al., 2000). Auch gibt es Hinweise auf eine reziproke Beziehung zwischen kognitiver Aktivität und aktuellen kognitiven Leistungen, sodass initial leistungsfähigere Personen sich bevorzugt Umwelten aussetzen, die ihre kognitiven Fähigkeiten und somit die CR verstärkt aufbauen (Schooler & Mulatu, 2001; Bosma et al., 2002). Befunde der Zwillingsforschung unterstreichen jedoch auch die Wichtigkeit der Umwelteinflüsse: „The findings of these analyses do not support the hypothesis that genetic influences explain the association between dementia and low education. Rather, it appears that environmental influences in common between members of twin pairs account for the association” (Gatz et al. 2007, S. 236).

Relativierend ist weiterhin anzumerken, dass nicht alle Faktoren der CR positiv mit der Intelligenz korreliert sind (z.B. soziale Aktivität, Li & Kanazawa, 2016). Auch ist eine bilinguale Erziehung oft Folge vorausgegangener elterlicher Immigration und keine freiwillige Entscheidung. Die vorliegenden Studienergebnisse zeigen keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der CR und dem geschätzten Intelligenzniveau (Raven-Matrizentest). Es ist anzumerken, dass der Raven-Matrizentest ein zwar oft eingesetztes Messinstrument zur Erfassung der allgemeinen (fluiden) Intelligenz ist, jedoch aufgrund der Unidimensionalität kein erschöpfendes Intelligenzprofil erfassen kann und auch in der Vergangenheit nicht zwangsläufig mit hoher schulischer Leistung assoziiert war (Mills, Ablard & Brody, 1993). Friedman et al. (2006) berichtet von einem Zusammenhang zwischen Intelligenz und der Updating-Funktion des AG, nicht jedoch mit der Shifting- und Inhibitionsfunktion und schlußfolgert: „Current intelligence measures do not equally assess a wide range of executive control abilities likely required for many ‚intelligent‘ behaviors“ (S. 172). Zugleich war die CR in der vorliegenden Untersuchung mit Leistungen in allen drei

Domänen exekutiver Funktionen positiv assoziiert, die in vorausgegangenen Untersuchungen u. a. mit unterschiedlich guter Lernfähigkeit aus Interventionen einhergingen (Verhaeghen & Marcoen, 1996; Nyberg, 2005) und somit von hoher praktischer Relevanz sind. Festzuhalten ist, dass zwar die CR oft durch Intelligenzmaße geschätzt wird, aber nicht auf die alleinige Betrachtung der Intelligenz reduziert werden darf.

Neben insgesamt besseren Leistungen der Hoch-CR-Probanden in exekutiven Funktionen, die als prädiktiv für zahlreiche kognitive Funktionen und den kognitiven Alterungsprozess gelten, zeigt die Veränderung der AG-Kapazitätswerte (AOSPAN) im 2-Jahres-Intervall ein nicht uninteressantes Ergebnis. Während ältere Probanden mit einer hohen CR ihre Leistung in der Wiederholungstestung steigern konnten, war kein Lerneffekt bei älteren Probanden mit geringer CR zu beobachten. Jüngere Gering-CR-Probanden konnten ihre Leistungsergebnisse wenngleich nicht statistisch signifikant, dennoch numerisch verbessern. Im Rahmen von Trainingsstudien des plastizitätsorientierten „Testing the Limits“-Paradigmas, wird im Gegensatz zu den üblichen kognitiven Statusleistungen versucht, die latenten Leistungsreserven durch bspw. kurzzeitiges Üben oder Testwiederholungen („baseline reserve capacity“) oder durch die Erfassung von Leistungsgrenzen nach einem Training („developmental reserve capacity“) zu ermitteln (Neher & Sowarka, 1999). Die Überlegenheit der „developmental reserve capacity“ gegenüber der „baseline reserve capacity“ konnte nicht immer nachgewiesen werden (Neher & Sowarka, 1999). Aufgrund einsetzender hirnstruktureller Veränderungen profitieren demenzgefährdete Personen weniger von leistungsoptimierenden Bedingungen (Singer & Lindenberger, 2000). Ebenso weisen auch gesunde Ältere trotz stark überlappender Leistungen in der Einmalmessung (Pretest) im Vergleich zu jüngeren Personen eine mit dem Alter abnehmende Lernfähigkeit auf (Posttest, Baltes & Kliegl, 1988). Plastizitätsorientierte Maße (u. a. Wiederholungstestungen) sind nach Sowarka, Neher, Gutzmann, Kühl & Baltes (2000) ein besseres Maß zur Erkennung demenzgefährdeter Personen in nichtklinischen Stichproben und leisten signifikante Vorhersagen des mentalen Gesundheitsstatus nach zwei Jahren. Der AG-Kapazitätsleistung (AOSPAN-Aufgabe) kommt bereits als Statusleistung eine wichtige Rolle bei der Vorhersage einer Vielzahl kognitiver Leistungen zu (Unsworth et al., 2005). Mehr noch, Aufgaben zur AG-Kapazität konnten den frühen Beginn einer Alzheimer Demenz voraussagen (Rosen, Bergeson et al., 2002). Die vorliegenden Ergebnisse deuten jedoch auch darauf hin, dass bereits bei gesunden Arbeitnehmern zwischen 45 und 65 Jahren bei geringer CR eine für kognitive Verluste prädiktiv geltende abnehmende Lernfähigkeit beobachtet werden kann.

Aufgrund der geringeren Zellenbesetzung zum zweiten Untersuchungszeitpunkt erscheint aus praktischer Relevanz eine unabhängige Befundreplikation sehr wünschenswert.

Da die Wahrscheinlichkeit für dementielle Erkrankungen bereits ab dem 65. Lebensjahr und damit noch vor dem Renteneintrittsalter deutlich ansteigt (Livingston et al., 2017), ist es sinnvoll dem kognitiven Abbau frühzeitig präventiv entgegen zu wirken. Nach Livingston et al. (2017) können dabei bis zu 1/3 der Demenzfälle deutlich verzögert oder gänzlich vermieden werden, wenn allein einige bekannte Faktoren wie Bluthochdruck, Schulbildung, Sport, soziales Engagement, Hörverlust, Diabetes, Depression und Übergewicht berücksichtigt werden. Auch die CR ist in hohem Maße ein praktisches Konstrukt, welches für jedes Alter und jedes Intelligenzniveau ein effektives Werkzeug zur Verzögerung und ggf. gänzlichen Vermeidung kognitiver Defizite im späten Lebensalter beitragen kann (Wang et al., 2002). Ähnlich wie ein physisch aktiver Lebensstil in jedem Lebensalter gesundheitsförderliche Effekte zeigt (Neviani et al., 2017), wird für die CR ein lebenslang kumulativ wirkender Ressourcenaufbau angenommen. Vorliegende Ergebnisse sprechen jedoch dafür, dass bereits im Berufsalter nicht nur leistungsfördernde und zentralnervöse Verarbeitungsunterschiede sichtbar werden, sondern auch für Demenz prädiktive Testmaße betroffen sein könnten.

Der Aufbau der CR kann vielfältig erfolgen. Direkte Analysen zellulärer und molekularer Veränderungen des Gehirns infolge geistiger Stimulation sind am lebenden Menschen schwer möglich. Aus tierexperimentellen Untersuchungen an gesunden Modellen ist bekannt, dass eine reizreiche Umgebung zahlreiche Gehirnveränderungen auf zellulärer Ebene durch Stimulation der Neuro-, Glio-, Angio- und Synaptogenese als auch auf der molekularen Ebene durch Modulation vielfältiger Prozesse, u. a. der Neurotransmitter und Neutrophine induziert (Gelfo et al., 2017). Es gibt sogar Hinweise zu Umkehrungen struktureller Schäden durch Umweltvariablen (Costa et al., 2007). In vorausgegangenen Untersuchungen stand insbesondere die schulische Bildung beim Aufbau der CR im Fokus des Interesses. Untersuchungen zu anderen Komponenten der CR bescheinigen auch weniger direktiven Lernprozessen vergleichbare Resultate, sodass es beim Erhalt der geistigen Fähigkeiten im Alter in erster Linie nicht nur um Wissensaneignung, sondern um neuartige Erfahrungen und den Prozess des Denkens an sich geht.

In einem 20-wöchigen Feldexperiment (Stine-Morrow, Parisi, Morrow & Park, 2008) beschäftigte sich die Experimentalgruppe in Kleingruppen mit der Erarbeitung von Problemlösungen und zeigte anschließend im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne vergleichbare kognitive Aktivität positive Veränderungen zwischen dem Pre- und Posttest für

fluide Funktionen. Die Teilhabe an kognitiv stimulierenden Aktivitäten milderte somit altersbedingte Einbußen in fluiden Fähigkeiten ohne ein spezifisches Fähigkeitstraining.

Eine weitere kontrollierte klinische Interventionsstudie an demenzgefährdeten Probanden (Küster et al., 2016) kam zu dem Ergebnis, dass die globale kognitive Leistung und die Gedächtnisfunktion stärker von einem aktiven Lebensstil im Sinne der CR als einem 10-wöchigen kognitiven oder physischen Training beeinflusst werden. Küster et al. (2016) schlussfolgern, dass: „An active lifestyle may differ from training interventions in dosage and variety of activities as well as intrinsic motivation and enjoyment. These factors might be crucial for designing novel interventions, which are more efficient than currently available training interventions“ (S. 315).

Aus klinischer Sicht könnte im Rahmen (betriebs-)ärztlicher Untersuchungen, zur Prävention späterer postoperativer kognitiver Dysfunktionen (Feinkohl et al., 2017) oder bei der Diagnose chronischer Erkrankungen mit anzunehmenden kognitiven Beeinträchtigungen, der CR-Status durch wenige kurze Fragen erfragt und als Präventivmaßnahme in die Beratung oder Behandlung einbezogen werden.

Eine Integration CR-fördernder Aktivitäten in den Berufsalltag erscheint sinnvoll. Denkbar wären Aufenthaltsbereiche an Arbeitsplätzen mit kognitiv, sozial und physisch stimulierender Umgebung freiwilligen Charakters (z.B. Schachbretter, Karten- und Denkspiele, Werkkeller, Malateliers, Leserunden, gemeinsame Essenszeiten und -orte), die viele Arbeitnehmer erreichen und solche miteinbeziehen, die aufgrund von Vertragsbindungen in Freizeit- und Sportclubs, langen Wegezeiten, fehlenden Mitstreitern, antizipierter zeitlicher und finanzieller Mehrbelastungen in ihrer Freizeit regelmäßige zusätzliche Aktivitäten neben dem Beruf meiden. Neben der Prävention des kognitiven Alterns sind auch die Effekte des emotionalen Wohlbefindens bei einer aktiveren Lebensgestaltung nicht zu unterschätzen (Menec, 2003).

### *Stärken und Limitationen*

Die vorliegende Untersuchung hat einige Vorteile gegenüber vorausgehenden Untersuchungen zur kognitiven Reserve. Unter Ableitung des EEG, welches in der CR-Literatur gegenüber in der Demenzerforschung vorherrschenden bildgebenden Verfahren (fMRT, PET) stark unterrepräsentiert ist, konnten zugleich sechs Aufgaben zu exekutiven Funktionen verschiedener Domänen (AG, KF, IH) bearbeitet und sowohl in Bezug auf Leistungsvariablen als auch elektrophysiologische Parameter vergleichend untersucht werden. Das EEG erlaubte dabei u. a. Aussagen zur neuronalen Verarbeitungsgeschwindigkeit, die

den bildgebenden Verfahren nicht zugänglich sind. Die P3-Latenz bietet eine von der Motorik unabhängige Messung kognitiver Prozesse und korreliert negativ mit mentaler Funktion bei gesunden Erwachsenen, aber auch bei festgestellter Demenz (Rossini et al., 2007).

Übereinstimmend zu Opdebeeck et al. (2016) Anmerkung: „Using only one proxy measure of CR does not provide a complete picture, as CR is a fluid construct resulting from a combination of experiences and activities over the course of an individual's life“ (S. 42), beruhte die Erfassung der CR im Gegensatz zu der oft auf einige wenige CR-Komponenten reduzierten Betrachtung (i.d.R. Schulbildung und IQ, vgl. Meng & D'Arcy, 2012) auf einer umfassenden Zusammenführung mehrerer in der CR-Literatur etablierter Komponenten. Auch wurde aus theoretischen Überlegungen die Schulbildung um die Jahre der beruflichen Ausbildung bzw. der Regelstudienzeit ergänzt (vgl. Feinkohl et al., 2017; Sattler, 2011). Die fehlende Berücksichtigung nur schwer veränderbarer zusätzlicher Variablen wie bspw. des sozioökonomischen Status oder des Intelligenzniveaus macht die vorliegenden Ergebnisse in höherem Grad praktisch relevant.

Mit dem Versuch der Clusteranalyse wurde anhand empirisch ermittelter Ähnlichkeit eine eindeutige Zuteilung der Probanden zu der Hoch- bzw. Gering-CR-Gruppe erreicht. So konnte eine Schätzung unbekannter Gewichte der einzelnen Komponenten zur Gesamt-CR vermieden und den Überlappungen zwischen den vermutlich nicht orthogonalen CR-Komponenten (z.B. Bildung und Beruf, Opdebeeck et al., 2016) Rechnung getragen werden. Bis auf die Komponente „soziale Aktivität“, die in beiden Clustern gleich stark ausgeprägt war, erfolgte die theoretisch angenommene Zuordnung der restlichen CR-Komponenten erwartungsentsprechend. Die nachträgliche separate statistische Analyse der sozialen Aktivität in Bezug auf Leistungsdaten und elektrophysiologische Parameter erbrachte in der untersuchten Stichprobe ebenfalls keine statistisch relevanten Ergebnisse. Ein Überblick über konzeptuelle Schwierigkeiten bei der Erfassung der kognitiven Reserve ist Jones et al. (2011) zu entnehmen.

Vorausgegangene Untersuchungen legen für die hier als ein zusammengesetztes Maß betrachteten Komponenten der CR (Bildung, Beruf, Instrumentalunterricht, Bilingualismus, kognitive und soziale Aktivitäten) eine differentielle Wirkweise über verschiedene kognitive Domänen nahe. So ist die Bildung stärker mit Gedächtnisleistungen als mit anderen exekutiven Funktionen assoziiert, während für die Berufskomplexität und kognitiv stimulierende Aktivitäten das Gegenteil zutrifft (Überblick siehe Opdebeeck et al., 2016). Auch scheinen unterschiedliche CR-Komponenten die Prozesse auf der zentralnervösen Ebene differentiell zu modifizieren. So stand bei vergleichbaren Leistungsdaten der

Bilingualismus im Vergleich zum Instrumentalunterricht in engerem Zusammenhang zu den N2- und P3-Amplituden, während Instrumentalunterricht eine größere Assoziation zur Variation der N2- und P2-Amplituden aufwies (Moreno et al., 2014). Die Zusammenlegung verschiedener, miteinander nicht hoch korrelierender CR-Komponenten nivellierte größtenteils die Leistungsunterschiede über die exekutiven Aufgaben hinweg, sodass in Übereinstimmung zu Opdebeeck et al. (2016) insgesamt positive, moderate Assoziationen zwischen der Gesamt-CR und der Leistung über die untersuchten kognitiven Domänen hinweg beobachtet werden konnten. Da die CR als Konsequenz aus der Gesamtheit kognitiv stimulierender Lebenseinflüsse über die Lebensspanne hinweg definiert ist, waren weniger die komponentenspezifischen Anteile, sondern vielmehr ihre Mischung und damit die gemeinsame Basis der CR von Interesse.

Ein weiterer positiver Aspekt der Untersuchung ist die nach zwei Jahren realisierte Follow-up-Testung, die durch die erreichte Befundreplikation wesentlich die Reliabilität und die Interpretation der Ergebnisse stärken konnte. Nicht auszuschließen waren Retest-Effekte wie eine Leistungssteigerung durch wiederholtes Testen oder generelle Gewöhnung an die Testsituation oder eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Abnahme von Interesse und Motivation (Lövdén & Lindenberger, 2005). Auch von dem Alter und der Ausprägung der CR unabhängige Kohorteneffekte auf die Aufgabenleistung (z.B. Sicherheit im Umgang mit Computer) sind im Rahmen altersvergleichender Untersuchungen, trotz der vorausgegangenen Trainingsphase, nicht gänzlich zu vermeiden. Zugleich konnten viele die kognitive Leistung ebenfalls beeinflussende konfundierende Variablen erfasst und in der Datenauswertung berücksichtigt werden (u. a. Sport (Colcombe & Kramer, 2003), Intelligenz, Verarbeitungsgeschwindigkeit (Salthouse et al., 2003) und das Schlafverhalten (Alhola & Polo-Kantola, 2007)). Obwohl in der Besonderheit der Stichprobenziehung viele Vorteile zu sehen sind, wie die fehlende Testerfahrung der Probanden und reiche Informationsbasis durch die vorausgegangene Interviewerhebung, reduzierten bestimmte Stichprobenmerkmale mit hoher Wahrscheinlichkeit die Stärke tatsächlich bestehender Zusammenhänge. Die Probanden waren im Unterschied zur repräsentativ erhobenen S-MGA-Stichprobe deutlich besser gebildet (siehe Abschnitt 5.3), was die Streuung in dieser wesentlichen Komponente der CR erheblich reduzierte und damit die möglicherweise stärkere Leistungsvariation in der untersuchten Altersgruppe verschleierte. Studien zum AD-Risiko weisen jedoch darauf hin, dass insbesondere ein hoher Bildungsgrad protektiv ist, während ein mittleres und geringes Bildungsniveau sich in der protektiven Wirkung weniger stark unterscheiden (Sattler, 2011) und die vorgenommene Gruppeneinteilung in niedriges/mittleres vs. hohes Bildungsniveau

rechtfertigen (vgl. Kap. 5.4). Auch fiel die berufliche Laufbahn der Studienteilnehmer im Vergleich zur bundesdeutschen Repräsentativerhebung zugunsten vorwiegend geistig arbeitender Probanden aus. Die Unterschiede in der Ausprägung zwischen hoher und geringer CR waren somit kleiner als in der Allgemeinbevölkerung zu erwarten. Das Drop-out betraf bis auf wenige Ausnahmen erwartungsgemäß die leistungsschwächeren Personen (Lövdén & Lindenberger, 2005) und reduzierte die Teilstichprobengröße vor allem in der älteren Probandengruppe. Zu nennen sind weiterhin allgemein laborexperimentelle Einschränkungen wie die relativ kleinen Stichproben und eine eingeschränkte externe Validität. Aufgrund der Einschränkung auf das mittlere Erwachsenenalter können keine allgemeingültigen Aussagen über andere Altersgruppen getroffen werden.

### *Ausblick*

Vorausgegangene sowie vorliegende Untersuchungsergebnisse liefern vielversprechende Anhaltspunkte für die Sensitivität der EKP-Methodik zur Untersuchung der CR (Moreno et al., 2014; Speer & Soldan, 2015). Die Vorteile des EEG mit seiner hohen zeitlichen Auflösung sollten künftig stärker in die CR-Forschung einbezogen werden. Es scheint zudem als kosten- und zeitgünstige Variante ebenfalls geeignet zu sein, den Aufbau der CR über die Zeit zu objektivieren. Hierzu wäre die Rolle der P3 als Biomarker kognitiver Reserve zu validieren und weitere EKP-Komponenten wie die N2 und P2 im Zusammenhang mit der CR zu untersuchen (Moreno et al., 2014). Eine unabhängige Replikation vorliegender Ergebnisse ist bei einer größeren Unterschiedlichkeit der Substichproben hinsichtlich der CR-Variablen anzustreben. Aus theoretischer Sicht ist eine Beurteilung der postulierten zeitlichen Abfolge der CR-Wirkmechanismen über die Lebensspanne hinweg (Kapazität, Effizienz, Kompensation) wünschenswert.

Da angenommen werden kann, dass die CR bereits im jungen Erwachsenenalter wirksam ist, sind Bemühungen zu Präventivmaßnahmen in diesem Alter, u. a. vergleichende Interventionsmaßnahmen zwischen kognitivem Training und (freiwilliger) kognitiv anregender Aktivität durchzuführen und zu bewerten. Die plastizitätsorientierten Kennwerte im Rahmen des „Testing the Limits“-Ansatzes wären nicht nur unter Einbezug des Alters, sondern auch der CR zu untersuchen und Aussagen über die differentielle Lernfähigkeit in Abhängigkeit von der CR zu treffen. Insgesamt wäre es von Vorteil, wenn künftige Forschungsbemühungen die Rolle der CR bereits ab dem frühen Erwachsenenalter stärker berücksichtigten.

## Fazit

Im Zuge durchschnittlich abnehmender kognitiver Funktionsfähigkeit und des zugleich steigenden Renteneintrittsalters wurde der Frage nachgegangen, inwiefern das Konzept der kognitiven Reserve mit alterungssensitiven exekutiven Funktionen im Zusammenhang steht und damit potentiell den kognitiven Leistungsminderungen bereits im Berufsalter entgegenwirken kann. Zu diesem Zweck wurden unter Ableitung eines EEG zwei Probandengruppen im mittleren und hohen Berufsalter in drei AG-Aufgaben und jeweils einer Aufgabe zur Erfassung der AG-Kapazität, der kognitiven Flexibilität und der Inhibitionskontrolle im 2-Jahres-Abstand untersucht und mittels einer Clusteranalyse einer hohen vs. geringen Ausprägung der CR (Bildungsgrad, Berufskomplexität, soziale und mental stimulierende Freizeitaktivitäten, Bilingualismus, Instrumentenunterricht) zugeteilt. Leistungsdaten sowie ausgewählte Parameter der P3-Komponente der EKP sollten Rückschlüsse auf die aktuelle und im 2-Jahres-Verlauf beobachtete kognitive Leistungsfähigkeit sowie dieser zugrundeliegende neuronale Informationsverarbeitung geben. Die Untersuchungsergebnisse bestätigten den Leistungsvorteil einer hohen CR in den eingesetzten Aufgaben zu exekutiven Funktionen. Eine hohe CR ging zu beiden Untersuchungszeitpunkten mit durchschnittlich kürzeren Reaktionszeiten, geringeren Fehlerraten und einer größeren AG-Kapazität einher. Dabei war der Vorteil einer hohen CR bei der Genauigkeit der Aufgabenbearbeitung stärker ausgeprägt als bei der Bearbeitungsgeschwindigkeit. In mehreren Aufgaben profitierten Probanden von der hohen CR gerade in den anspruchsvollen Aufgabenbedingungen.

Darüber hinaus sprachen zwei Befunde für eine potentiell leistungserhaltende Funktion der CR in der älteren Probandengruppe. Zum einen lag in mehreren Aufgaben eine Tendenz zu höheren Fehlerraten gerade bei älteren Probanden mit einer geringen CR vor. Zum anderen fehlte den älteren Probanden mit einer geringen CR die Fähigkeit zur Steigerung ihrer insgesamt geringen AG-Kapazität zum zweiten Untersuchungszeitpunkt, während älteren Probanden mit einer hohen CR eine deutliche Leistungsverbesserung gelang. Dieser Befund kann ein Hinweis auf eine altersbedingt einsetzende nachlassende Lernfähigkeit sein, da in der jüngeren Probandengruppe trotz geringer CR eine numerische Leistungssteigerung zu verzeichnen war.

Auch auf der neuronalen Ebene konnten Informationsverarbeitungsunterschiede, unter anderem durch eine schnellere mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit bei einer hohen im Vergleich zur geringen CR nachgewiesen werden. Darüber hinaus war eine hohe CR je nach



Alter differentiell mit der P3-Amplitude und in der Aufgabe zur kognitiven Flexibilität mit einem Anterior-Shift assoziiert. Somit scheint die P3-Komponente eine potentielle Sensitivität gegenüber der CR aufzuweisen und spricht für Unterschiede in der neuronalen Informationsverarbeitung in Abhängigkeit vom Alter und der CR.

Die Effekte der CR waren insgesamt moderat, konnten jedoch replizierbar über mehrere Aufgaben und zwei Untersuchungszeitpunkte nachgewiesen werden. Dabei erreichte in mehreren Aufgaben sowohl hinsichtlich der Reaktionszeiten als auch Fehlerraten ein zu t1 vorliegender statistischer Trend zu t2 die Signifikanzschwelle.

Es kann insgesamt geschlussfolgert werden, dass eine hohe CR im Berufsalter mit besseren exekutiven Leistungen einhergeht, mit Unterschieden in der neuronalen Informationsverarbeitung assoziiert ist und leistungserhaltend bei altersbedingt abnehmenden kognitiven Funktionen wirken kann. Eine frühe Investition in die CR wird empfohlen.

## Literaturverzeichnis

- Aartsen, M. J., Smits, C. H., Tilburg, T. van., Knipscheer, K. C. P. M., & Deeg, J. H. (2002). Activity in older adults: cause or consequence of cognitive functioning? A longitudinal study on everyday activities and cognitive performance in older adults. *The Journals of Gerontology*, 57B(2), 153-162. doi:10.1093/geronb/57.2.P153
- Abrams, L. (2009). Exploring the generality of retest effects: Commentary on "When does age-related cognitive decline begin?". *Neurobiology of aging*, 30(4), 525-527. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2008.11.012
- Adam, S., Bonsang E., Grotz C., & Perelman S. (2013). Occupational activity and cognitive reserve: implications in terms of prevention of cognitive aging and Alzheimer's disease. *Clinical interventions in aging*, 8, 377-390. doi:10.2147/CIA.S39921
- Adrover-Roig, D., & Barceló, F. (2010). Individual differences in aging and cognitive control modulate the neural indexes of context updating and maintenance during task switching. *Cortex*, 46(4), 434-450. doi:10.1016/j.cortex.2009.09.012
- Ahles, T. A., Saykin, A. J., McDonald, B. C., Li, Y., Furstenberg, C. T., Hanscom, B. S., ... & Kaufman, P. A. (2010). Longitudinal assessment of cognitive changes associated with adjuvant treatment for breast cancer: impact of age and cognitive reserve. *Journal of Clinical Oncology*, 28(29), 4434-4440. doi:10.1200/JCO.2009.27.0827
- Akbaraly, T. N., Portet, F., Fustini, S., Dartigues, J. F., Artero, S., Rouaud, O., ... & Berr, C. (2009). Leisure activities and the risk of dementia in the elderly results from the Three-City Study. *Neurology*, 73(11), 854-861. doi:10.1212/WNL.0b013e3181b7849b
- Alhola, P., & Polo-Kantola, P. (2007). Sleep deprivation: Impact on cognitive performance. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 3(5), 553-567. Abgerufen am 09. September, 2017, von <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2656292/>
- Alladi, S., Bak, T. H., Duggirala, V., Surampudi, B., Shailaja, M., Shukla, A. K., ... & Kaul, S. (2013). Bilingualism delays age at onset of dementia, independent of education and

- immigration status. *Neurology*, 81(22), 1938-1944. doi:10.1212/01.wnl.0000436620.33155.a4
- Alladi, S., Bak, T. H., Mekala, S., Rajan, A., Chaudhuri, J. R., Mioshi, E., ... & Kaul, S. (2015). Impact of bilingualism on cognitive outcome after stroke. *Stroke*, 47(1), 258-261. doi:10.1161/STROKEAHA.115.010418
- Alladi, S., Bak, T. H., Shailaja, M., Gollahalli, D., Rajan, A., Surampudi, B., ... & Kaul, S. (2017). Bilingualism delays the onset of behavioral but not aphasic forms of frontotemporal dementia. *Neuropsychologia*, 99, 207-212. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2017.03.021
- Allport, D. A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. In C. Umiltà & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and Performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (S. 421–452). Cambridge, MA: MIT Press.
- Alperin, B. R., Mott, K. K., Rentz, D. M., Holcomb, P. J., & Daffner, K. R. (2014). Investigating the age-related “anterior shift” in the scalp distribution of the P3b component using principal component analysis. *Psychophysiology*, 51(7), 620-633. doi:10.1111/psyp.12206
- Amieva, H., Stoykova, R., Matharan, F., Helmer, C., Antonucci, T. C., & Dartigues, J. F. (2010). What aspects of social network are protective for dementia? Not the quantity but the quality of social interactions is protective up to 15 years later. *Psychosomatic medicine*, 72(9), 905-911. doi:10.1097/PSY.0b013e3181f5e121
- Amodio, P., Montagnese, S., Spinelli, G., Schiff, S., & Mapelli, D. (2017). Cognitive reserve is a resilience factor for cognitive dysfunction in hepatic encephalopathy. *Metabolic Brain Disease*, 32(4), 1287-1293. doi:10.1007/s11011-017-0032-2
- Amoretti, S., Bernardo, M., Bonnin, C. M., Bioque, M., Cabrera, B., Mezquida, G., ... & Torrent, C. (2016). The impact of cognitive reserve in the outcome of first-episode

- psychoses: 2-year follow-up study. *European Neuropsychopharmacology*, 26(10), 1638-1648. doi:10.1016/j.euroneuro.2016.07.003
- Andel, R., Crowe, M., Pedersen, N. L., Mortimer, J., Crimmins, E., Johansson, B., & Gatz, M. (2005). Complexity of work and risk of Alzheimer's disease: a population-based study of Swedish twins. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 60(5), 251-258. doi:10.1093/geronb/60.5.P251
- Andel, R., Vigen, C., Mack, W. J., Clark, L. J., & Gatz, M. (2006). The effect of education and occupational complexity on rate of cognitive decline in Alzheimer's patients. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 12(1), 147-152. doi:10.1017/S1355617706060206
- Anders, T. R., Fozard, J. L., & Lillyquist, T. D. (1972). Effects of age upon retrieval from short-term memory. *Developmental Psychology*, 6(2), 214-217. doi:10.1037/h0032103
- Arenaza-Urquijo, E. M., Wirth, M., & Chételat, G. (2015). Cognitive reserve and lifestyle: moving towards preclinical Alzheimer's disease. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 7, 134. doi:10.3389/fnagi.2015.00134
- Aronson, M. (1993). Does excessive television viewing contribute to the development of dementia? *Medical hypotheses*, 41(5), 465-466. doi:10.1016/0306-9877(93)90128-D
- Aster, M. von., Neubauer, A., & Horn, R. (2006). *Wechsler Intelligenztest für Erwachsene (WIE). Deutschsprachige Bearbeitung und Adaptation des WAIS-III von David Wechsler*. Frankfurt/Main, Germany: Harcourt Test Services.
- Atkinson, A. L., (2016). Does Bilingualism Delay the Development of Dementia? *Journal of European Psychology Students*, 7(1), 43–50. doi:10.5334/jeps.375
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of learning and motivation*, 2, 89-195. doi:10.1016/S0079-7421(08)60422-3

- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of learning and motivation*, 8, 47-89. doi:10.1016/S0079-7421(08)60452-1
- Balbag, M. A., Pedersen, N. L., & Gatz, M. (2014). Playing a musical instrument as a protective factor against dementia and cognitive impairment: a population-based twin study. *International Journal of Alzheimer's Disease*, 2014, 1-6, Article ID 836748. doi:10.1155/2014/836748
- Balinsky, B. (1941). An analysis of the mental factors of various age groups from nine to sixty. *Genetic Psychology Monographs*, 23, 191-234.
- Baltes, P. B., & Kliegl, R. (1988). Lernen und Gedächtnis im Alter: über Plastizität und deren Grenzen. *Natur- und Ganzheitsmedizin*, 1, 39-44. Abgerufen am 09. September, 2017, von [https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/3849/file/1988\\_Lernen.pdf](https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/3849/file/1988_Lernen.pdf)
- Baltes P. B., Reese H. W., & Lipsitt L. P. (1980). Life-span developmental psychology. *Annual review of psychology*, 31, 65-110. doi:10.1146/annurev.ps.31.020180.000433
- Barkley, R. A. (1997). *ADHD and the nature of self-control*. New York: Guilford Press.
- Barkley, R. A. (2012). *Executive functions: What they are, how they work, and why they evolved*. New York: Guilford Press.
- Barnes, L. L., De Leon, C. M., Wilson, R. S., Bienias, J. L., & Evans, D. A. (2004). Social resources and cognitive decline in a population of older African Americans and whites. *Neurology*, 63(12), 2322-2326. doi:10.1212/01.WNL.0000147473.04043.B3
- Bartrés-Faz, D., & Arenaza-Urquijo, E. M. (2011). Structural and functional imaging correlates of cognitive and brain reserve hypotheses in healthy and pathological aging. *Brain topography*, 24(3-4), 340-357. doi:10.1007/s10548-011-0195-9
- Bartrés-Faz, D., Solé-Padullés, C., Junqué, C., Rami, L., Bosch, B., Bargalló, N., ... & Molinuevo, J. L. (2009). Interactions of cognitive reserve with regional brain anatomy

- and brain function during a working memory task in healthy elders. *Biological psychology*, 80(2), 256-259. doi:10.1016/j.biopsycho.2008.10.005
- Bartus, R. T., & Levere, T. E. (1977). Frontal decortication in rhesus monkeys: A test of the interference hypothesis. *Brain research*, 119(1), 233-248. doi:10.1016/0006-8993(77)90103-2
- Barulli, D., & Stern, Y. (2013). Efficiency, capacity, compensation, maintenance, plasticity: emerging concepts in cognitive reserve. *Trends in cognitive sciences*, 17(10), 502-509. doi:10.1016/j.tics.2013.08.012
- Bassuk, S. S., Glass, T. A., & Berkman, L. F. (1999). Social disengagement and incident cognitive decline in community-dwelling elderly persons. *Annals of internal medicine*, 131(3), 165-173. doi:10.7326/0003-4819-131-3-199908030-00002
- Bellgrove, M. A., Hester, R., & Garavan, H. (2004). The functional neuroanatomical correlates of response variability: evidence from a response inhibition task. *Neuropsychologia*, 42(14), 1910-1916. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2004.05.007
- Bennett, D. A., Schneider, J. A., Tang, Y., Arnold, S. E., & Wilson, R. S. (2006). The effect of social networks on the relation between Alzheimer's disease pathology and level of cognitive function in old people: a longitudinal cohort study. *The Lancet Neurology*, 5(5), 406-412. doi:10.1016/S1474-4422(06)70417-3
- Berger, H. (1934). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 101(1), 452-469. doi:10.1007/BF01789984
- Berlin, L. (2003). *The role of inhibitory control and executive functioning in hyperactivity/ADHD* (Dissertation), Uppsala University. Abgerufen am 09. September, 2017, von <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:162327/FULLTEXT01.pdf>

- Bertoli, S., & Probst, R. (2005). Lack of standard N2 in elderly participants indicates inhibitory processing deficit. *Neuroreport*, 16(17), 1933-1937. doi:10.1097/01.wnr.0000187630.45633.0a
- Bialystok, E. (2001). *Bilingualism in development: Language, literacy, and cognition*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511605963
- Bialystok, E. (2006). Effect of bilingualism and computer video game experience on the Simon task. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 60(1), 68-79. doi:10.1037/cjep2006008
- Bialystok, E., Craik, F. I., Binns, M. A., Osher, L., & Freedman, M. (2014). Effects of bilingualism on the age of onset and progression of MCI and AD: Evidence from executive function tests. *Neuropsychology*, 28(2), 290-304. doi:10.1037/neu0000023
- Bialystok, E., Craik, F. I., & Freedman, M. (2007). Bilingualism as a protection against the onset of symptoms of dementia. *Neuropsychologia*, 45(2), 459-464. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.10.009
- Bialystok, E., Craik, F. I., Green, D. W., & Gollan, T. H. (2009). Bilingual minds. *Psychological science in the public interest*, 10(3), 89-129. doi:10.1177/1529100610387084
- Bialystok, E., Craik, F. I., Klein, R., & Viswanathan, M. (2004). Bilingualism, aging, and cognitive control: evidence from the Simon task. *Psychology and aging*, 19(2), 290-303. doi:10.1037/0882-7974.19.2.290
- Bialystok, E., Craik, F. I., & Luk, G. (2008). Cognitive control and lexical access in younger and older bilinguals. *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory, and cognition*, 34(4), 859. doi:10.1037/0278-7393.34.4.859
- Bialystok, E., Craik, F. I., & Luk, G. (2012). Bilingualism: consequences for mind and brain. *Trends in cognitive sciences*, 16(4), 240-250. doi:10.1016/j.tics.2012.03.001

- Bialystok, E., Craik, F. I., & Ryan, J. (2006). Executive control in a modified antisaccade task: Effects of aging and bilingualism. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32(6), 1341-1354. doi:10.1037/0278-7393.32.6.1341
- Bialystok, E., & Luk, G. (2012). Receptive vocabulary differences in monolingual and bilingual adults. *Bilingualism: Language and Cognition*, 15(2), 397-401. doi:10.1017/S136672891100040X
- Bialystok, E., Luk, G., Peets, K. F., & Yang, S. (2010). Receptive vocabulary differences in monolingual and bilingual children. *Bilingualism: Language and Cognition*, 13(4), 525-531. doi:10.1017/S1366728909990423
- Bialystok, E., Martin, M. M., & Viswanathan, M. (2005). Bilingualism across the lifespan: The rise and fall of inhibitory control. *International Journal of Bilingualism*, 9(1), 103-119. doi:10.1177/13670069050090010701
- Boden, S., Gajewski, P. D., Willemsen, R., Getzmann, S., & Falkenstein, M. (2017). *Depressive Symptomatik, Burnout, arbeitsbezogene Faktoren und zentralnervöse Informationsverarbeitung. Im Verbundprojekt F2318: Depressionen, Burnout und kognitive Defizite – Studien an Beschäftigten zum Einfluss arbeitsbezogener und individueller Determinanten* (Unveröffentlichter Forschungsbericht). Dortmund: BAuA.
- Bonner-Jackson, A., Long, J. D., Westervelt, H., Tremont, G., Aylward, E., Paulsen, J. S., ... & Coordinators of the Huntington Study Group. (2013). Cognitive reserve and brain reserve in prodromal Huntington's disease. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 19(7), 739-750. doi:10.1017/S1355617713000507
- Boots, E. A., Schultz, S. A., Almeida, R. P., Oh, J. M., Kosciak, R. L., Dowling, M. N., ... & Asthana, S. (2015). Occupational complexity and cognitive reserve in a middle-aged cohort at risk for Alzheimer's disease. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 30(7), 634-642. doi:10.1093/arclin/acv041
- Borella, E., Carretti, B., & De Beni, R. (2008). Working memory and inhibition across the adult life-span. *Acta psychologica*, 128(1), 33-44. doi:10.1016/j.actpsy. 2007.09.008



- Borroni, B., Premi, E., Bozzali, M., & Padovani, A. (2012). Reserve mechanisms in neurodegenerative diseases: from bench to bedside and back again. *Current medicinal chemistry*, 19(36), 6112-6118. doi:10.2174/0929867311209066112
- Bosma, H., Boxtel, M. P. van., Ponds, R. W. H. M., Jelicic, M., Houx, P., Metsemakers, J., & Jolles, J. (2002). Engaged lifestyle and cognitive function in middle and old-aged, non-demented persons: a reciprocal association? *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 35(6), 575-581. doi:10.1007/s00391-002-0080-y
- Botwinick, J., & Storandt, M. (1974). *Memory, related functions and age*. Oxford, England: Charles C Thomas.
- Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *Neuroimage*, 5(1), 49-62. doi:10.1006/nimg.1996.0247
- Braver, T. S., Reynolds, J. R., & Donaldson, D. I. (2003). Neural mechanisms of transient and sustained cognitive control during task switching. *Neuron*, 39(4), 713-726. doi:10.1016/S0896-6273(03)00466-5
- Brizzee, K. R., Ordry, J. M., & Bartus, R. T. (1980). Localization of cellular changes within multimodal sensory regions in aged monkey brain: Possible implications for age-related cognitive loss. *Neurobiology of aging*, 1(1), 45-52. doi:10.1016/0197-4580(80)90023-8
- Broadhead, W. E., Kaplan, B. H., James, S. A., Wagner, E. H., Schoenbach, V. J., Grimson, R., ... & Gehlbach, S. H. (1983). The epidemiologic evidence for a relationship between social support and health. *American Journal of epidemiology*, 117(5), 521-537. doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a113575
- Brochard, R., Dufour, A., & Despres, O. (2004). Effect of musical expertise on visuospatial abilities: Evidence from reaction times and mental imagery. *Brain and cognition*, 54(2), 103-109. doi:10.1016/S0278-2626(03)00264-1

- Brockmole, J. R., & Logie, R. H. (2013). Age-Related Change in Visual Working Memory: A Study of 55,753 Participants Aged 8–75. *Frontiers in Psychology*, 4, 12. doi:10.3389/fpsyg.2013.00012
- Buckner, R. L. (2004). Memory and executive function in aging and AD: multiple factors that cause decline and reserve factors that compensate. *Neuron*, 44(1), 195-208. doi:10.1016/j.neuron.2004.09.006
- Buckner, R. L. (2005). Three Principles for Cognitive Aging Research: Multiple Causes and Sequelae, Variance in Expression and Response, and the Need for Integrative Theory. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 267-285). Oxford: Oxford University Press.
- Bugg, J. M., Jacoby, L. L., & Toth, J. P. (2008). Multiple levels of control in the Stroop task. *Memory & cognition*, 36(8), 1484-1494. doi:10.3758/MC.36.8.1484
- Bugos, J. A., Perlstein, W. M., McCrae, C. S., Brophy, T. S., & Bedenbaugh, P. H. (2007). Individualized piano instruction enhances executive functioning and working memory in older adults. *Aging and Mental Health*, 11(4), 464-471. doi:10.1080/13607860601086504
- Burgess, P. W., & Shallice, T. (1996). Response suppression, initiation and strategy use following frontal lobe lesions. *Neuropsychologia*, 34(4), 263-272. doi:10.1016/0028-3932(95)00104-2
- Burle, B., Vidal, F., Tandonnet, C., & Hasbroucq, T. (2004). Physiological evidence for response inhibition in choice reaction time tasks. *Brain and cognition*, 56(2), 153-164. doi:10.1016/j.bandc.2004.06.004
- Caamaño-Isorna, F., Corral, M., Montes-Martínez, A., & Takkouche, B. (2006). Education and dementia: a meta-analytic study. *Neuroepidemiology*, 26(4), 226-232. doi:10.1159/000093378

- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17(1), 85-100. doi:10.1037/0882-7974.17.1.85
- Cabeza, R., Anderson, N. D., Locantore, J. K., & McIntosh, A. R. (2002). Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *Neuroimage*, 17(3), 1394-1402. doi:10.1006/nimg.2002.1280
- Cabeza, R., Grady, C. L., Nyberg, L., McIntosh, A. R., Tulving, E., Kapur, S., ... & Craik, F. I. (1997). Age-related differences in neural activity during memory encoding and retrieval: a positron emission tomography study. *Journal of neuroscience*, 17(1), 391-400. Abgerufen am 09. September, 2017, von <http://www.jneurosci.org/content/17/1/391.long>
- Cabeza, R., Nyberg, L., & Park, D. C. (2005). Cognitive neuroscience of ageing. Emergence of a new discipline. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 3-15). Oxford: Oxford University Press.
- Calvo, N., García, A. M., Manóiloff, L., & Ibáñez, A. (2016). Bilingualism and cognitive reserve: a critical overview and a plea for methodological innovations. *Frontiers in aging neuroscience*, 7, 249. doi:10.3389/fnagi.2015.00249
- Cappell, K. A., Gmeindl, L., & Reuter-Lorenz, P. A. (2010). Age differences in prefrontal recruitment during verbal working memory maintenance depend on memory load. *Cortex*, 46(4), 462-473. doi:10.1016/j.cortex.2009.11.009
- Carlson, M. C., Helms, M. J., Steffens, D. C., Burke, J. R., Potter, G. G., & Plassman, B. L. (2008). Midlife activity predicts risk of dementia in older male twin pairs. *Alzheimer's & Dementia*, 4(5), 324-331. doi:10.1016/j.jalz.2008.07.002
- Carlson, S. M., & Meltzoff, A. N. (2008). Bilingual experience and executive functioning in young children. *Developmental science*, 11(2), 282-298. doi:10.1111/j.1467-7687.2008.00675.x

- Carrillo-de-la-Pena, M. T., & Cadaveira, F. (2000). The effect of motivational instructions on P300 amplitude. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 30(4), 232-239. doi:10.1016/S0987-7053(00)00220-3
- Chan, A. S., Ho, Y. C., & Cheung, M. C. (1998). Music training improves verbal memory. *Nature*, 396(6707), 128-128. doi:10.1038/24075
- Chan, R. C., Shum, D., Touloupoulou, T., & Chen, E. Y. (2008). Assessment of executive functions: Review of instruments and identification of critical issues. *Archives of clinical neuropsychology*, 23(2), 201-216. doi:10.1016/j.acn.2007.08.010
- Chao, L. L., & Knight, R. T. (1995). Human prefrontal lesions increase distractibility to irrelevant sensory inputs. *Neuroreport*, 6(12), 1605-1610. doi:10.1097/00001756-199508000-00005
- Chao, L. L., & Knight, R. T. (1997). Age-related prefrontal alterations during auditory memory. *Neurobiology of Aging*, 18(1), 87-95. doi:10.1016/S0197-4580(96)00161-3
- Chen, Y. N., Mitra, S., & Schlaghecken, F. (2008). Sub-processes of working memory in the N-back task: An investigation using ERPs. *Clinical Neurophysiology*, 119(7), 1546-1559. doi:10.1016/j.clinph.2008.03.003
- Chertkow, H., Whitehead, V., Phillips, N., Wolfson, C., Atherton, J., & Bergman, H. (2010). Multilingualism (but not always bilingualism) delays the onset of Alzheimer disease: evidence from a bilingual community. *Alzheimer Disease & Associated Disorders*, 24(2), 118-125. doi:10.1097/WAD.0b013e3181ca1221
- Christensen, H., Anstey, K. J., Parslow, R. A., Maller, J., Mackinnon, A., & Sachdev, P. (2007). The brain reserve hypothesis, brain atrophy and aging. *Gerontology*, 53(2), 82-95. doi:10.1159/000096482
- Clair-Thompson, H. L. (2007). The influence of strategies on relationships between working memory and cognitive skills. *Memory*, 15(4), 353-365. doi:10.1080/09658210701261845

- Coderre, E. L., Heuven, W. J. van., & Conklin, K. (2013). The timing and magnitude of Stroop interference and facilitation in monolinguals and bilinguals. *Bilingualism: Language and Cognition*, 16(2), 420-441. doi:10.1017/s1366728912000405
- Cohn, N. B., Dustman, R. E., & Bradford, D. C. (1984). Age-related decrements in stroop color test performance. *Journal of clinical psychology*, 40(5), 1244-1250. doi:10.1002/1097-4679(198409)40:5<1244::AID-JCLP2270400521>3.0.CO; 2-D
- Colcombe, S., & Kramer, A. F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. *Psychological science*, 14(2), 125–130. doi:10.1111/1467-9280.t01-1-01430
- Correa Ribeiro, P. C., Lopes, C. S., & Lourenço, R. A. (2013). Complexity of lifetime occupation and cognitive performance in old age. *Occupational medicine*, 63(8), 556-562. doi:10.1093/occmed/kqt115
- Costa, D. A., Cracchiolo, J. R., Bachstetter, A. D., Hughes, T. F., Bales, K. R., Paul, S. M., ... & Potter, H. (2007). Enrichment improves cognition in AD mice by amyloid-related and unrelated mechanisms. *Neurobiology of aging*, 28(6), 831-844. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2006.04.009
- Costa, A., Hernández, M., Costa-Faidella, J., & Sebastián-Gallés, N. (2009). On the bilingual advantage in conflict processing: Now you see it, now you don't. *Cognition*, 113(2), 135-149. doi:10.1016/j.cognition.2009.08.001
- Craik, F. I. (1968). Two components in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 7(6), 996-1004. doi:10.1016/S0022-5371(68)80058-1
- Craik, F. I. (1977). Age differences in human memory. In J. E. Birren & W. K. Schaie (Hrsg.), *Handbook of the Psychology of Aging* (S. 384-420). New York: Van Nostrand Reinhold Company.

- Craik, F. I., Bialystok, E., & Freedman, M. (2010). Delaying the onset of Alzheimer disease Bilingualism as a form of cognitive reserve. *Neurology*, 75(19), 1726-1729. doi:10.1212/WNL.0b013e3181fc2a1c
- Crawford, J. R., Bryan, J., Luszcz, M. A., Obonsawin, M. C., & Stewart, L. (2000). The executive decline hypothesis of cognitive aging: Do executive deficits qualify as differential deficits and do they mediate age-related memory decline? *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 7(1), 9-31. doi:10.1076/anec.7.1.9.806
- Crowe, M., Andel, R., Pedersen, N. L., Johansson, B., & Gatz, M. (2003). Does participation in leisure activities lead to reduced risk of Alzheimer's disease? A prospective study of Swedish twins. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 58(5), 249-255. doi:10.1093/geronb/58.5.P249
- Crystal, H., Dickson, D., Fuld, P., Masur, D., Scott, R., Mehler, M., Masdeu, J., Kawas, C., Aronson, M., & Wolfson, L. (1988). Clinico-pathologic studies in dementia: nondemented subjects with pathologically confirmed Alzheimer's disease. *Neurology*, 38(11), 1682–1687. doi: 10.1212/WNL.38.11.1682
- Czigler, I., Pató, L., Poszet, E., & Balázs, L. (2006). Age and novelty: event-related potentials to visual stimuli within an auditory oddball—visual detection task. *International journal of psychophysiology*, 62(2), 290-299. doi:10.1016/j.ijpsycho.2006.05.008
- Daffner, K. R. (2010). Promoting Successful Cognitive Aging: A Comprehensive Review. *Journal of Alzheimer's Disease*, 19, 1101–1122. doi:10.3233/JAD-2010-1306
- Daffner, K. R., Chong, H., Sun, X., Tarbi, E. C., Riis, J. L., McGinnis, S. M., & Holcomb, P. J. (2011). Mechanisms underlying age-and performance-related differences in working memory. *Journal of cognitive neuroscience*, 23(6), 1298-1314. doi:10.1162/jocn.2010.21540
- Daffner, K. R., Mesulam, M. M., Scinto, L. F. M., Acar, D., Calvo, V., Faust, R., ... & Holcomb, P. (2000). The central role of the prefrontal cortex in directing attention to novel events. *Brain*, 123(5), 927-939. doi:10.1093/brain/123.5.927

- Daffner, K. R., Ryan, K. K., Williams, D. M., Budson, A. E., Rentz, D. M., Scinto, L. F., & Holcomb, P. J. (2005). Age-related differences in novelty and target processing among cognitively high performing adults. *Neurobiology of aging*, 26(9), 1283-1295. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2004.11.007
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, 19(4), 450-466. doi:10.1016/S0022-5371(80)90312-6
- Davidson, D. J., Zacks, R. T., & Williams, C. C. (2003). Stroop Interference, Practice, and Aging. *Neuropsychology, Development, and Cognition. Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition*, 10(2), 85–98. doi:10.1076/anec.10.2.85.14463
- Davis, S. W., Dennis, N. A., Daselaar, S. M., Fleck, M. S., & Cabeza, R. (2007). Que PASA? The posterior–anterior shift in aging. *Cerebral cortex*, 18(5), 1201-1209. doi:10.1093/cercor/bhm155
- Dawson, W. J. (2014). Benefits of music training are widespread and lifelong: a bibliographic review of their non-musical effects. *Medical problems of performing artists*, 29(2), 57-63. Abgerufen am 09. September, 2017, von <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24925171>
- Degé, F., Kubicek, C., & Schwarzer, G. (2011). Music lessons and intelligence: A relation mediated by executive functions. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 29(2), 195-201. doi:10.1525/mp.2011.29.2.195
- De Groot, A. M. B. (2013). Reading. In Grosjean, F. & Li, P. *The psycholinguistics of bilingualism* (S. 73-99). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Delorme, A., Sejnowski, T., & Makeig, S. (2007). Enhanced detection of artifacts in EEG data using higher-order statistics and independent component analysis. *Neuroimage*, 34(4), 1443-1449. doi:10.1016/j.neuroimage.2006.11.004

- De Sanctis, P., Katz, R., Wylie, G. R., Sehatpour, P., Alexopoulos, G. S., & Foxe, J. J. (2008). Enhanced and bilateralized visual sensory processing in the ventral stream may be a feature of normal aging. *Neurobiology of aging*, 29(10), 1576-1586. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2007.03.021
- Deutsche Rentenversicherung (2017). Rentenbeginn- und Rentenhöhenrechner. Abgerufen am 09. September, 2017, von [http://www.deutsche-rentenversicherung.de/Allgemein/de/Navigation/5\\_Services/02\\_online\\_dienste/03\\_online\\_rechner\\_nutzen/rentenbeginn\\_hoehenrechner/Rentenbeginnrechner\\_node.html](http://www.deutsche-rentenversicherung.de/Allgemein/de/Navigation/5_Services/02_online_dienste/03_online_rechner_nutzen/rentenbeginn_hoehenrechner/Rentenbeginnrechner_node.html)
- Di, X., Rypma, B., & Biswal, B. B. (2014). Correspondence of executive function related functional and anatomical alterations in aging brain. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 48, 41-50. doi:10.1016/j.pnpbp.2013.09.001
- Dijkstra, T., & Heuven, W. J. van. (2002). The architecture of the bilingual word recognition system: From identification to decision. *Bilingualism: Language and cognition*, 5(3), 175-197. doi:10.1017/S1366728902003012
- Dinteren, R. van., Arns, M., Jongsma, M. L., & Kessels, R. P. (2014). P300 development across the lifespan: a systematic review and meta-analysis. *PloS one*, 9(2), e87347. doi:10.1371/journal.pone.0087347
- Donchin, E., & Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and brain sciences*, 11(3), 357-374. doi:10.1017/S0140525X00058027
- Dreher, J. C., Koechlin, E., Ali, S. O., & Grafman, J. (2002). The roles of timing and task order during task switching. *Neuroimage*, 17(1), 95-109. doi:10.1006/nimg.2002.1169
- Edland, S. D., Xu, Y., Plevak, M., O'brien, P., Tangalos, E. G., Petersen, R. C., & Jack, C. R. (2002). Total intracranial volume: normative values and lack of association with Alzheimer's disease. *Neurology*, 59(2), 272-274. doi:10.1212/WNL.59.2.272



- Elias, M. F., Beiser, A., Wolf, P. A., Au, R., White, R. F., & D'agostino, R. B. (2000). The preclinical phase of Alzheimer disease: a 22-year prospective study of the Framingham Cohort. *Archives of neurology*, 57(6), 808-813. doi:10.1001/archneur. 57.6.808
- Elst, W. van der., Boxtel, M. P. van., Breukelen, G. J. van., & Jolles, J. (2006). The Stroop color-word test: influence of age, sex, and education; and normative data for a large sample across the adult age range. *Assessment*, 13(1), 62-79. doi:10.1177/1073191105283427
- Engel de Abreu, P. M., Cruz-Santos, A., Tourinho, C. J., Martin, R., & Bialystok, E. (2012). Bilingualism enriches the poor: Enhanced cognitive control in low-income minority children. *Psychological science*, 23(11), 1364-1371. doi:10.1177/ 0956797612443836
- Ertel, K. A., Glymour, M. M., & Berkman, L. F. (2008). Effects of social integration on preserving memory function in a nationally representative US elderly population. *American journal of public health*, 98(7), 1215-1220. doi:10.2105/AJPH.2007.113654
- Esiri, M. M., & Chance, S. A. (2012). Cognitive reserve, cortical plasticity and resistance to Alzheimer's disease. *Alzheimer's research & therapy*, 4(2), 7. doi:10.1186/alzrt105
- Espinosa, P. S., Kryscio, R. J., Mendiondo, M. S., Schmitt, F. A., Wekstein, D. R., Markesbery, W. R., & Smith, C. D. (2006). Alzheimer's disease and head circumference. *Journal of Alzheimer's Disease*, 9(1), 77-80. doi:10.3233/JAD-2006-9108
- Fabiani, M. (2012). It was the best of times, it was the worst of times: a psychophysiology's view of cognitive aging. *Psychophysiology*, 49(3), 283–304. doi:10.1111/j.1469-8986.2011.01331.x
- Fabiani, M., Friedman, D., & Cheng, J. C. (1998). Individual differences in P3 scalp distribution in older adults, and their relationship to frontal lobe function. *Psychophysiology*, 35(6), 698-708. doi:10.1111/1469-8986.3560698

- Fabiani, M., & Gratton, G. (2005). Electrophysiological and optical measures of cognitive aging. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 85-106). Oxford: Oxford University Press.
- Fabiani, M., Gratton, G., & Federmeier, K. D. (2007). Event-related brain potentials: methods, theory and applications. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary & G. G. Berntson (Hrsg.), *Handbook of psychophysiology* (S. 85-119). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511546396
- Farias, S. T., Mungas, D., Reed, B., Carmichael, O., Beckett, L., Harvey, D., ... & DeCarli, C. (2012). Maximal brain size remains an important predictor of cognition in old age, independent of current brain pathology. *Neurobiology of aging*, 33(8), 1758-1768. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2011.03.017
- Fay, T. B., Yeates, K. O., Taylor, H. G., Bangert, B., Dietrich, A. N. N., Nuss, K. E., ... & Wright, M. (2010). Cognitive reserve as a moderator of postconcussive symptoms in children with complicated and uncomplicated mild traumatic brain injury. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 16(1), 94-105. doi:10.1017/S1355617709991007
- Feinkohl, I., Winterer, G., D. Spies, C., & Pischon, T. (2017). Cognitive Reserve and the Risk of Postoperative Cognitive Dysfunction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Deutsches Ärzteblatt International*, 114(7), 110–117. doi:10.3238/arztebl.2017.0110
- Ferrari, C., Nacmias, B., Bagnoli, S., Piaceri, I., Lombardi, G., Pradella, S., ... & Sorbi, S. (2014). Imaging and cognitive reserve studies predict dementia in presymptomatic Alzheimer's disease subjects. *Neurodegenerative Diseases*, 13(2-3), 157-159. doi:10.1159/000353690
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (4th Edition). London: Sage Publications Ltd.

- Fisher, G. G., Stachowski, A., Infurna, F. J., Faul, J. D., Grosch, J., & Tetrack, L. E. (2014). Mental work demands, retirement, and longitudinal trajectories of cognitive functioning. *Journal of occupational health psychology, 19*(2), 231-242. doi:10.1037/a0035724
- Fjell, A. M., & Walhovd, K. B. (2004). Life-span changes in P3a. *Psychophysiology, 41*(4), 575-583. doi:10.1111/j.1469-8986.2004.00177.x
- Foley, J. M., Ettenhofer, M. L., Kim, M. S., Behdin, N., Castellon, S. A., & Hinkin, C. H. (2012). Cognitive reserve as a protective factor in older HIV-positive patients at risk for cognitive decline. *Applied Neuropsychology: Adult, 19*(1), 16-25. doi:10.1080/09084282.2011.595601
- Forstmeier, S., & Maercker, A. (2010). Potentially modifiable risk factors in the development of Alzheimer's Disease. *European Neurological Review, 4*, 18-21. doi:10.17925/USN.2010.05.02.18
- Fox, L. A., Shor, R. E., & Steinman, R. J. (1971). Semantic gradients and interference in naming color, spatial direction, and numerosity. *Journal of Experimental Psychology, 91*(1), 59-65. doi:10.1037/h0031850
- Franklin, M. S., Sledge Moore, K., Yip, C. Y., Jonides, J., Rattray, K., & Moher, J. (2008). The effects of musical training on verbal memory. *Psychology of Music, 36*(3), 353-365. doi:10.1177/0305735607086044
- Fratiglioni, L., & Wang, H. X. (2007). Brain reserve hypothesis in dementia. *Journal of Alzheimer's disease, 12*(1), 11-22. doi:10.3233/JAD-2007-12103
- Fratiglioni, L., Wang, H. X., Ericsson, K., Maytan, M., & Winblad, B. (2000). Influence of social network on occurrence of dementia: a community-based longitudinal study. *The lancet, 355*(9212), 1315-1319. doi:10.1016/S0140-6736(00)02113-9

- Frick K. M., & Benoit J. D. (2010). Use it or lose it: environmental enrichment as a means to promote successful cognitive aging. *The Scientific World Journal*, 16(10), 1129–1141. doi:10.1100/tsw.2010.111
- Friedman, D. (2008). The components of aging. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Hrsg.), *Oxford handbook of event-related potential components* (S. 513-536). New York: Oxford University Press.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The reading span test and its predictive power for reading comprehension ability. *Journal of memory and language*, 51(1), 136-158. doi:10.1016/j.jml.2004.03.008
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological science*, 17(2), 172-179. doi:10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x
- Frömer, R., Stürmer, B., & Sommer, W. (2016). (Don't) Mind the effort: Effects of contextual interference on ERP indicators of motor preparation. *Psychophysiology*, 53(10), 1577-1586. doi:10.1111/psyp.12703
- Gaeta, H., Friedman, D., & Ritter, W. (2003). Auditory selective attention in young and elderly adults: the selection of single versus conjoint features. *Psychophysiology*, 40(3), 389-406. doi:10.1111/1469-8986.00042
- Gajewski, P. (2005). *Enkodierungsprozesse beim Aufgabenwechsel* (Dissertation), Heinrich-Heine-Universität. Abgerufen am 09. September, 2017, von [https://www.researchgate.net/publication/29747447\\_Enkodierungsprozesse\\_beim\\_Aufgabenwechsel](https://www.researchgate.net/publication/29747447_Enkodierungsprozesse_beim_Aufgabenwechsel)
- Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2013). Effects of task complexity on ERP components in Go/Nogo tasks. *International Journal of Psychophysiology*, 87(3), 273-278. doi:10.1016/j.ijpsycho.2012.08.007

- Games, P. A., & Lucas, P. A. (1966). Power of the analysis of variance of independent groups on non-normal and normally transformed data. *Educational and Psychological Measurement*, 26(2), 311-327. doi:10.1177/001316446602600205
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *Journal of Neuroscience*, 23(27), 9240-9245. doi:10.1523/JNEUROSCI.3403-13.2013
- Gatz, M., Mortimer, J. A., Fratiglioni, L., Johansson, B., Berg, S., Andel, R., Crowe, M., Fiske, A., Reynolds, C. A., & Pedersen, N.L. (2007). Accounting for the relationship between low education and dementia: a twin study. *Physiology & behavior*, 92(1-2), 232-237. doi:10.1016/j.physbeh.2007.05.042
- Gatz, M., Reynolds, C. A., Fratiglioni, L., Johansson, B., Mortimer, J.A., Berg, S., Fiske, A., & Pedersen, N. L. (2006). Role of genes and environments for explaining Alzheimer disease. *Archives of general psychiatry*, 63(2), 168-174. doi:10.1001/archpsyc.63.2.168
- Gazzaley, A. H., & D'Esposito, M. (2005). BOLD Functional MRI and Cognitive Aging. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 107-131). Oxford: Oxford University Press.
- Gelfo, F., Mandolesi, L., Serra, L., Sorrentino, G., & Caltagirone, C. (2017). The neuroprotective effects of experience on cognitive functions: Evidence from animal studies on the neurobiological bases of brain reserve. *Neuroscience*, pii: S0306-4522(17)30551-1. doi:10.1016/j.neuroscience.2017.07.065
- Ghaffar, O., Fiati, M., & Feinstein, A. (2012). Occupational attainment as a marker of cognitive reserve in multiple sclerosis. *PloS one*, 7(10), e47206. doi:10.1371/journal.pone.0047206
- Ghisletta, P., Bickel, J. F., & Lövdén, M. (2006). Does activity engagement protect against cognitive decline in old age? Methodological and analytical considerations. *The*

- Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 61(5), 253-261. doi:10.1093/geronb/61.5.P253
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., ... & Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature neuroscience*, 2(10), 861-863. doi:10.1038/13158
- Goldstein, I. B., Bartzokis, G., Guthrie, D., & Shapiro, D. (2002). Ambulatory blood pressure and brain atrophy in the healthy elderly. *Neurology*, 59(5), 713-719. doi:10.1212/WNL.59.5.713
- Gollan, T. H., & Ferreira, V. S. (2009). Should I stay or should I switch? A cost-benefit analysis of voluntary language switching in young and aging bilinguals. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(3), 640-665. doi:10.1037/a0014981
- Gollan, T. H., Montoya, R. I., Fennema-Notestine, C., & Morris, S. K. (2005). Bilingualism affects picture naming but not picture classification. *Memory & cognition*, 33(7), 1220-1234. doi:10.3758/BF03193224
- Grady, C. L. (1998). Brain imaging and age-related changes in cognition. *Experimental gerontology*, 33(7), 661-673. doi:10.1016/S0531-5565(98)00022-9
- Grady, C. L. (2002). Age-related differences in face processing: A meta-analysis of three functional neuroimaging experiments. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 56(3), 208-220. doi:10.1037/h0087398
- Grady, C. L. (2005). Functional Connectivity During Memory Tasks in Healthy Aging and Dementia. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 286-308). Oxford: Oxford University Press.

- Grady, C. L., Bernstein, L. J., Beig, S., & Siegenthaler, A. L. (2002). The effects of encoding task on age-related differences in the functional neuroanatomy of face memory. *Psychology and Aging, 17*(1), 7-23. doi:10.1037/0882-7974.17.1.7
- Grady, C. L., McIntosh, A. R., Beig, S., Keightley, M. L., Burian, H., & Black, S. E. (2003). Evidence from functional neuroimaging of a compensatory prefrontal network in Alzheimer's disease. *Journal of Neuroscience, 23*(3), 986-993. Abgerufen am 09. September, 2017, von <http://www.jneurosci.org/content/23/3/986.long>
- Grant, A., Dennis, N. A., & Li, P. (2014). Cognitive control, cognitive reserve, and memory in the aging bilingual brain. *Frontiers in Psychology, 5*, 1401. doi:10.3389/fpsyg.2014.01401
- Graves, A. B., Mortimer, J. A., Larson, E. B., Wenzlow, A., Bowen, J. D., & McCormick, W. C. (1996). Head circumference as a measure of cognitive reserve. Association with severity of impairment in Alzheimer's disease. *The British journal of psychiatry, 169*(1), 86-92. doi:10.1192/bjp.169.1.86
- Graves, A. B., Rajaram, L., Bowen, J. D., McCormick, W. C., McCurry, S. M., & Larson, E. B. (1999). Cognitive decline and Japanese culture in a cohort of older Japanese Americans in King County, WA: the Kame Project. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences, 54*(3), 154-161. doi:10.1093/geronb/54B.3.S154
- Green, D. W. (1998). Mental control of the bilingual lexico-semantic system. *Bilingualism: Language and cognition, 1*(2), 67-81. doi:10.1017/S1366728998000133
- Greenwood, P. M. (2007). Functional plasticity in cognitive aging: Review and hypothesis. *Neuropsychology, 21*(6), 657-673. doi:10.1037/0894-4105.21.6.657
- Groussard, M., Viader, F., Landeau, B., Desgranges, B., Eustache, F., & Platel, H. (2014). The effects of musical practice on structural plasticity: the dynamics of grey matter changes. *Brain and cognition, 90*, 174-180. doi:10.1016/j.bandc.2014.06.013

- Gunning-Dixon, F. M., & Raz, N. (2000). The cognitive correlates of white matter abnormalities in normal aging: a quantitative review. *Neuropsychology*, 14(2), 224–232. doi:10.1037/0894-4105.14.2.224
- Guzmán-Vélez, E., & Tranel, D. (2015). Does bilingualism contribute to cognitive reserve? Cognitive and neural perspectives. *Neuropsychology*, 29(1), 139-150. doi:10.1037/neu0000105
- Hall, C. B., Derby, C., LeValley, A., Katz, M. J., Verghese, J., & Lipton, R. B. (2007). Education delays accelerated decline on a memory test in persons who develop dementia. *Neurology*, 69(17), 1657-1664. doi:10.1212/01.wnl.0000278163.82636.30
- Hall, C. B., Lipton, R. B., Sliwinski, M., Katz, M. J., Derby, C. A., & Verghese, J. (2009). Cognitive activities delay onset of memory decline in persons who develop dementia. *Neurology*, 73(5), 356-361. doi:10.1212/WNL.0b013e3181b04ae3
- Hamm, V. P., & Hasher, L. (1992). Age and the availability of inferences. *Psychology and Aging*, 7(1), 56-64. doi:10.1037/0882-7974.7.1.56
- Hanna-Pladdy, B., & Gajewski, B. (2012). Recent and Past Musical Activity Predicts Cognitive Aging Variability: Direct Comparison with General Lifestyle Activities. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 198. doi:10.3389/fnhum.2012.00198
- Hanna-Pladdy, B., & MacKay, A. (2011). The relation between instrumental musical activity and cognitive aging. *Neuropsychology*, 25(3), 378-386. doi:10.1037/a0021895
- Hantz, E. C., Crummer, G. C., Wayman, J. W., Walton, J. P., & Frisina, R. D. (1992). Effects of musical training and absolute pitch on the neural processing of melodic intervals: A P3 event-related potential study. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 10(1), 25-42. doi:10.2307/40285536
- Harrison, S. L., Sajjad, A., Bramer, W. M., Ikram, M. A., Tiemeier, H., & Stephan, B. C. M. (2015). Exploring strategies to operationalize cognitive reserve: A systematic review of



- reviews. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 37(3), 253-264.  
doi:10.1080/13803395.2014.1002759
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52, 139-183.  
doi:10.1016/S0166-4115(08)62386-9
- Hartman, M., & Hasher, L. (1991). Aging and suppression: Memory for previously relevant information. *Psychology and Aging*, 6(4), 587-594. doi:10.1037/0882-7974.6.4.587
- Hasher, L., Stoltzfus, E. R., Zacks, R. T., & Rypma, B. (1991). Age and inhibition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17(1), 163-169.  
doi:10.1037/0278-7393.17.1.163
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. *Psychology of learning and motivation*, 22, 193-225.  
doi:10.1016/S0079-7421(08)60041-9
- Hasselhorn, M., & Grube, D. (2003). Das Arbeitsgedächtnis: Funktionsweise, Entwicklung und Bedeutung für kognitive Leistungsstörungen. *Sprache· Stimme· Gehör*, 27(1), 31-37. doi:10.1055/s-2003-37875
- Haug, H., & Eggers, R. (1991). Morphometry of the human cortex cerebri and corpus striatum during aging. *Neurobiology of aging*, 12(4), 336-338. doi:10.1016/0197-4580(91)90013-A
- Hedden, T., & Gabrieli, J. D. (2004). *Nature reviews neuroscience*, 5(2), 87-96.  
doi:10.1038/nrn1323
- Heilbroner, P. L., & Kemper, T. L. (1990). The cytoarchitectonic distribution of senile plaques in three aged monkeys. *Acta neuropathologica*, 81(1), 60-65.  
doi:10.1007/BF00662638

- Herholz, S. C., & Zatorre, R. J. (2012). Musical training as a framework for brain plasticity: behavior, function, and structure. *Neuron*, 76(3), 486-502. doi:10.1016/j.neuron.2012.10.011
- Hertzog, C., Kramer, A. F., Wilson, R. S., & Lindenberger, U. (2008). Enrichment effects on adult cognitive development: Can the functional capacity of older adults be preserved and enhanced? *Psychological science in the public interest*, 9(1), 1-65. doi:10.1111/j.1539-6053.2009.01034.x
- Hillary, F. G., & DeLuca, J. (2007). *Functional neuroimaging in clinical populations*. New York: Guilford Press.
- Hindle, J. V., Martyr, A., & Clare, L. (2014). Cognitive reserve in Parkinson's disease: a systematic review and meta-analysis. *Parkinsonism & related disorders*, 20(1), 1-7. doi:10.1016/j.parkreldis.2013.08.010
- Holtzman, R. E., Rebok, G. W., Saczynski, J. S., Kouzis, A. C., Wilcox Doyle, K., & Eaton, W. W. (2004). Social network characteristics and cognition in middle-aged and older adults. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 59(6), 278-284. doi:10.1093/geronb/59.6.P278
- Horn, J. L., & Cattell, R. B. (1967). Age differences in fluid and crystallized intelligence. *Acta psychologica*, 26, 107-129. doi:10.1016/0001-6918(67)90011-X
- Houx, P. J., Jolles, J., & Vreeling, F. W. (1993). Stroop interference: aging effects assessed with the Stroop Color-Word Test. *Experimental aging research*, 19(3), 209-224. doi:10.1080/03610739308253934
- Hultsch, D. F., Hertzog, C., Small, B. J., & Dixon, R. A. (1999). Use it or lose it: Engaged lifestyle as a buffer of cognitive decline in aging? *Psychology and Aging*, 14(2), 245-263. doi:10.1037/0882-7974.14.2.245

- Huttenlocher, P. R. (1979). Synaptic density in human frontal cortex – Developmental changes and effects of aging. *Brain Research*, 163(2), 195-205. doi:10.1016/0006-8993(79)90349-4
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., & Schlaug, G. (2009). Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, 29(10), 3019-3025. doi:10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009
- Ince, P. G. (2001). Pathological correlates of late-onset dementia in a multicenter community-based population in England and Wales. *Lancet*, 357, 169–175. doi:10.1016/S0140-6736(00)03589-3
- Ivanova, I., & Costa, A. (2008). Does bilingualism hamper lexical access in speech production? *Acta psychologica*, 127(2), 277-288. doi:10.1016/j.actpsy. 2007. 06.003
- Jagust, W. J., & Mormino, E. C. (2011). Lifespan brain activity,  $\beta$ -amyloid, and Alzheimer's disease. *Trends in cognitive sciences*, 15(11), 520-526. doi:10.1016/j.tics.2011.09.004
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: H. Holt and Company.
- Jäncke, L. (2009). Music drives brain plasticity. *F1000 Biology Reports*, 1, 78. doi:10.3410/B1-78
- Jenkins, R., Fox, N. C., Rossor, A. M., Harvey, R. J., & Rossor, M. N. (2000). Intracranial volume and Alzheimer disease: evidence against the cerebral reserve hypothesis. *Archives of Neurology*, 57(2), 220-224. doi:10.1001/archneur.57.2.220
- Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of Psychology*, 89, 5-82. Abgerufen am 09. September, 2017, von [https://archive.org/stream/mentalsetshift00jers/mentalsetshift00jers\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/mentalsetshift00jers/mentalsetshift00jers_djvu.txt)
- Jones, R. N., Manly, J., Glymour, M. M., Rentz, D. M., Jefferson, A. L., & Stern, Y. (2011). Conceptual and Measurement Challenges in Research on Cognitive Reserve. *Journal of*

- the International Neuropsychological Society: JINS*, 17(4), 593–601.  
doi:10.1017/S1355617710001748
- Jonides, J., Smith, E. E., Marshuetz, C., Koeppel, R. A., & Reuter-Lorenz, P. A. (1998). Inhibition in verbal working memory revealed by brain activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(14), 8410-8413. doi:10.1073/pnas.95.14.8410
- Karayanidis, F., Whitson, L. R., Heathcote, A., & Michie, P. T. (2011). Variability in Proactive and Reactive Cognitive Control Processes Across the Adult Lifespan. *Frontiers in Psychology*, 2, 318. doi:10.3389/fpsyg.2011.00318
- Kåreholt, I., Lennartsson, C., Gatz, M., & Parker, M. G. (2011). Baseline leisure time activity and cognition more than two decades later. *International journal of geriatric psychiatry*, 26(1), 65-74. doi:10.1002/gps.2490
- Karp, A., Andel, R., Parker, M. G., Wang, H. X., Winblad, B., & Fratiglioni, L. (2009). Mentally stimulating activities at work during midlife and dementia risk after age 75: follow-up study from the Kungsholmen Project. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, 17(3), 227-236. doi:10.1097/JGP.0b013e318190b691
- Katzman, R., Aronson, M., Fuld, P., Kawas, C., Brown, T., Morgenstern, H., Frishman, W., Gidez, L., Eder, H., & Ooi, W.L. (1989). Development of dementing illnesses in an 80-year-old volunteer cohort. *Annals of Neurology*, 25, 317–324. doi:10.1002/ana.410250402
- Kausler, D. H., & Hakami, M. K. (1982). Frequency judgments by young and elderly adults for relevant stimuli with simultaneously present irrelevant stimuli. *Journal of Gerontology*, 37(4), 438-442. doi:10.1093/geronj/37.4.438
- Kempermann, G., Kuhn, H. G., & Gage, F. H. (1997). More hippocampal neurons in adult mice living in an enriched environment. *Nature*, 386(6624), 493-495. doi:10.1038/386493a0

- Kieffaber, P. D., & Hetrick, W. P. (2005). Event-related potential correlates of task switching and switch costs. *Psychophysiology*, 42(1), 56-71. doi:10.1111/j.1469-8986.2005.00262.x
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of experimental psychology*, 55(4), 352. doi:10.1037/h0043688
- Kleih, S. C., Nijboer, F., Halder, S., & Kübler, A. (2010). Motivation modulates the P300 amplitude during brain–computer interface use. *Clinical Neurophysiology*, 121(7), 1023-1031. doi:10.1016/j.clinph.2010.01.034
- Kluwe, R. H. (1992). Gedächtnis und Wissen. In H. Spada (Hrsg), *Allgemeine Psychologie* (2. korrigierte Aufl.)(S. 115-188). Bern: Verlag Hans Huber.
- Knight, R. T. (1984). Decreased response to novel stimuli after prefrontal lesions in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 59(1), 9-20. doi:10.1016/0168-5597(84)90016-9
- Knight, R. T., Staines, W. R., Swick, D., & Chao, L. L. (1999). Prefrontal cortex regulates inhibition and excitation in distributed neural networks. *Acta psychologica*, 101(2), 159-178. doi:10.1016/S0001-6918(99)00004-9
- Koch, I. (2003). The role of external cues for endogenous advance reconfiguration in task switching. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10(2), 488-492. doi:10.3758/BF03196511
- Kopp, B., Lange, F., Howe, J., & Wessel, K. (2014). Age-related changes in neural recruitment for cognitive control. *Brain and cognition*, 85, 209-219. doi:10.1016/j.bandc.2013.12.008
- Kotter-Grühn, D., Kleinspehn-Ammerlahn, A., Hoppmann, C. A., Röcke, C., Rapp, M. A., Gerstorf, D., & Ghisletta, P. (2010). Veränderungen im hohen Alter: Zusammenfassung längsschnittlicher Befunde der Berliner Altersstudie. *Die Berliner Altersstudie* (3. Aufl., S. 659–689). Berlin: Akademie Verlag.

- Kousaie, S., & Phillips, N. A. (2012). Ageing and bilingualism: Absence of a “bilingual advantage” in Stroop interference in a nonimmigrant sample. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(2), 356-369. doi:10.1080/17470218.2011.604788
- Kowoll, M. E., Degen, C., Gorenc, L., Küntzelmann, A., Fellhauer, I., Giesel, F., ... Schröder, J. (2016). Bilingualism as a Contributor to Cognitive Reserve? Evidence from Cerebral Glucose Metabolism in Mild Cognitive Impairment and Alzheimer’s Disease. *Frontiers in Psychiatry*, 7, 62. doi:10.3389/fpsy.2016.00062
- Kramer, A. F., Hahn, S., & Gopher, D. (1999). Task coordination and aging: Explorations of executive control processes in the task switching paradigm. *Acta psychologica*, 101(2), 339-378. doi:10.1016/S0001-6918(99)00011-6
- Kray, J., Eppinger, B., & Mecklinger, A. (2005). Age differences in attentional control: An event-related potential approach. *Psychophysiology*, 42(4), 407-416. doi:10.1111/j.1469-8986.2005.00298.x
- Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in task switching. *Psychology and Aging*, 15(1), 126-147. doi:10.1037/0882-7974.15.1.126
- Kröger, E., Andel, R., Lindsay, J., Benounissa, Z., Verreault, R., & Laurin, D. (2008). Is complexity of work associated with risk of dementia? The Canadian Study of Health and Aging. *American journal of epidemiology*, 167(7), 820-830. doi:10.1093/aje/kwm382.
- Küster, O. C., Fissler, P., Laptinskaya, D., Thurm, F., Scharpf, A., Woll, A., ... & Kolassa, I. T. (2016). Cognitive change is more positively associated with an active lifestyle than with training interventions in older adults at risk of dementia: a controlled interventional clinical trial. *BMC psychiatry*, 16(1), 315. doi:10.1186/s12888-016-1018-z
- Kwong See, S. T., & Ryan, E. B. (1995). Cognitive mediation of adult age differences in language performance. *Psychology and Aging*, 10(3), 458-468. doi:10.1037/0882-7974.10.3.458

- Lawton, D. M., Gasquoine, P. G., & Weimer, A. A. (2015). Age of dementia diagnosis in community dwelling bilingual and monolingual Hispanic Americans. *Cortex*, 66, 141-145. doi:10.1016/j.cortex.2014.11.017
- Layton, B. (1975). Perceptual noise and aging. *Psychological Bulletin*, 82(6), 875-883. doi:10.1037/0033-2909.82.6.875
- Le Carret, N., Auriacombe, S., Letenneur, L., Bergua, V., Dartigues, J. F., & Fabrigoule, C. (2005). Influence of education on the pattern of cognitive deterioration in AD patients: the cognitive reserve hypothesis. *Brain and cognition*, 57(2), 120-126. doi:10.1016/j.bandc.2004.08.031
- Leon, I., Garcia, J., & Roldan-Tapia, L. (2011). Development of the scale of cognitive reserve in Spanish population: a pilot study. *Revista de neurologia*, 52(11), 653-660. Abgerufen am 11. November, 2017, von [https://www.researchgate.net/publication/51118004\\_Development\\_of\\_the\\_scale\\_of\\_cognitive\\_reserve\\_in\\_Spanish\\_population\\_A\\_pilot\\_study](https://www.researchgate.net/publication/51118004_Development_of_the_scale_of_cognitive_reserve_in_Spanish_population_A_pilot_study)
- Leon, I., García-García, J., & Roldan-Tapia, L. (2014). Estimating cognitive reserve in healthy adults using the Cognitive Reserve Scale. *PloS one*, 9(7), e102632. doi:10.1371/journal.pone.0102632
- Li, N. P., & Kanazawa, S. (2016). Country roads, take me home... to my friends: How intelligence, population density, and friendship affect modern happiness. *British Journal of Psychology*, 107, 675–697. doi:10.1111/bjop.12181
- Lindenberger, U. (2006). Soziale Teilhabe und Intelligenzentwicklung im Alter. *Jahrbuch 2005/2006*. Abgerufen am 11. November, 2017, von <https://www.mpg.de/303855/forschungsSchwerpunkt.pdf>
- Lindenberger, U., & Baltes, P. B. (1994). Sensory functioning and intelligence in old age: A strong connection. *Psychology and Aging*, 9(3), 339-355. doi:10.1037/0882-7974.9.3.339

- Livingston, G., Sommerlad, A., Orgeta, V., Costafreda, S. G., Huntley, J., Ames, D., ... & Cooper, C. (2017). Dementia prevention, intervention, and care. *The Lancet*, 390(10113), 2673-2734. doi:10.1016/S0140-6736(17)31363-6
- Logan, J. M., Sanders, A. L., Snyder, A. Z., Morris, J. C., & Buckner, R. L. (2002). Under-recruitment and nonselective recruitment: dissociable neural mechanisms associated with aging. *Neuron*, 33(5), 827-840. doi:10.1016/S0896-6273(02)00612-8
- López, M. E., Aurtinetxe, S., Pereda, E., Cuesta, P., Castellanos, N. P., Bruña, R., ... Bajo, R. (2014). Cognitive reserve is associated with the functional organization of the brain in healthy aging: a MEG study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, 125. doi:10.3389/fnagi.2014.00125
- Lövdén, M., & Lindenberger, U. (2005). Development of intellectual abilities in old age: From Age Gradients to Individuals. In O. Wilhelm and R. W. Engle (Hrsg.), *Understanding and Measuring Intelligence* (S. 203-221). Thousand Oaks, CA: SAGE.
- Lövdén, M., Rönnlund, M., Wahlin, Å., Bäckman, L., Nyberg, L., & Nilsson, L. G. (2004). The extent of stability and change in episodic and semantic memory in old age: Demographic predictors of level and change. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 59(3), 130-134. doi:10.1093/geronb/59.3.P130
- Lövdén, M., Wenger, E., Mårtensson, J., Lindenberger, U., & Bäckman, L. (2013). Structural brain plasticity in adult learning and development. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37(9), 2296-2310. doi:10.1016/j.neubiorev.2013.02.014
- Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, MA: MIT Press.



- Luck, S. J., Kappenman, E. S., Fuller, R. L., Robinson, B., Summerfelt, A., & Gold, J. M. (2009). Impaired response selection in schizophrenia: evidence from the P3 wave and the lateralized readiness potential. *Psychophysiology*, 46(4), 776-786. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00817.x
- Lustig, C., Hasher, L., & Zacks, R. T. (2007). Inhibitory deficit theory: Recent developments in a "new view". In D. S. Gorfein & C. M. MacLeod (Hrsg.), *Inhibition in cognition* (S. 145-162). APA Books: Washington DC. doi:10.1037/11587-008
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163-203. doi:10.1037/0033-2909.109.2.163
- MacPherson, S. E., Healy, C., Allerhand, M., Spanò, B., Tudor-Sfetea, C., White, M., ... & Cipolotti, L. (2017). Cognitive reserve and cognitive performance of patients with focal frontal lesions. *Neuropsychologia*, 96, 19-28. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2016.12.028
- Madden, D. J., Turkington, T. G., Provenzale, J. M., Denny, L. L., Hawk, T. C., Gottlob, L. R., & Coleman, R. E. (1999). Adult age differences in the functional neuroanatomy of verbal recognition memory. *Human brain mapping*, 7(2), 115-135. doi:10.1002/(SICI)1097-0193(1999)7:2<115::AID-HBM5>3.0.CO;2-N
- Madden, D. J., Turkington, T. G., Provenzale, J. M., Hawk, T. C., Hoffman, J. M., & Coleman, R. E. (1997). Selective and divided visual attention: Age-related changes in regional cerebral blood flow measured by H2 15O PET. *Human brain mapping*, 5(6), 389-409. doi:10.1002/(SICI)1097-0193(1997)5:6%3C389::AID-HBM1%3E3.0.CO;2-%23
- Mager, R., Bullinger, A. H., Brand, S., Schmidlin, M., Schärli, H., Müller-Spahn, F., ... & Falkenstein, M. (2007). Age-related changes in cognitive conflict processing: an event-related potential study. *Neurobiology of Aging*, 28(12), 1925-1935. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2006.08.001

- Malmö, R. B. (1942). Interference factors in delayed response in monkeys after removal of frontal lobes. *Journal of Neurophysiology*, 5, 295-308. doi:10.1152/jn.1942.5.4.295
- Mathias, J. L., & Wheaton, P. (2015). Contribution of brain or biological reserve and cognitive or neural reserve to outcome after TBI: a meta-analysis (prior to 2015). *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 55, 573-593. doi:10.1016/j.neubiorev.2015.06.001
- Matthews, G., Davies, D. R., Westerman, S. J., & Stammers, R. B. (Hrsg.). (2000). Human performance: Cognition, stress and individual differences. *Ageing and human performance* (S. 287-311). Hove, UK: Psychology Press.
- Mayr, U. (2001). Age differences in the selection of mental sets: The role of inhibition, stimulus ambiguity, and response-set overlap. *Psychology and Aging*, 16(1), 96-109. doi:10.1037/0882-7974.16.1.96
- McCarthy, G., & Wood, C. C. (1985). Scalp distributions of event-related potentials: an ambiguity associated with analysis of variance models. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 62(3), 203-208. doi:10.1016/0168-5597(85)90015-2
- McDowd, J. M., Oseas-Kreger, D. M., & Fillion, D. L. (1995). Inhibitory processes in cognition and aging. In F. N. Dempster & C. J. Brainerd (Eds.), *Interference and inhibition in cognition* (pp. 363-400). doi:10.1016/B978-012208930-5/50012-X
- McEvoy, L. K., Pellouchoud, E., Smith, M. E., & Gevins, A. (2001). Neurophysiological signals of working memory in normal aging. *Cognitive Brain Research*, 11(3), 363-376. doi:10.1016/S0926-6410(01)00009-X
- McEvoy, L. K., Smith, M. E., & Gevins, A. (1998). Dynamic cortical networks of verbal and spatial working memory: effects of memory load and task practice. *Cerebral cortex*, 8(7), 563-574. doi:10.1093/cercor/8.7.563

- Meißner-Pöthig, D., & Michalak, U. (1997). *Vitalität und ärztliche Intervention*. Stuttgart: Hippokrates Verlag.
- Menec, V. H. (2003). The relation between everyday activities and successful aging: A 6-year longitudinal study. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 58(2), 74-82. doi:10.1093/geronb/58.2.S74
- Meng, X., & D'Arcy, C. (2012). Education and dementia in the context of the cognitive reserve hypothesis: a systematic review with meta-analyses and qualitative analyses. *PloS one*, 7(6), e38268. doi:10.1371/journal.pone.0038268
- Merton, R. K. (1968). The Matthew effect in science. *Science*, 159(3810), 56-63. doi:10.1126/science.159.3810.56
- Mills, C. J., Ablard, K. E., & Brody, L. E. (1993). The Raven's Progressive Matrices: Its usefulness for identifying gifted/talented students. *Roeper Review*, 15(3), 183-186. doi:10.1080/02783199309553500
- Missonnier, P., Gold, G., Leonards, U., Costa-Fazio, L., Michel, J. P., Ibáñez, V., & Giannakopoulos, P. (2004). Aging and working memory: early deficits in EEG activation of posterior cortical areas. *Journal of Neural Transmission*, 111(9), 1141-1154. doi:10.1007/s00702-004-0159-2
- Mitchell, K. J., Johnson, M. K., Raye, C. L., & D'Esposito, M. (2000). fMRI evidence of age-related hippocampal dysfunction in feature binding in working memory. *Cognitive brain research*, 10(1), 197-206. doi:10.1016/S0926-6410(00)00029-X
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49-100. doi:10.1006/cogp.1999.0734
- Miyake, A., & Shah, P. (Hrsg.). (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge University Press.

- Monsell, S., Yeung, N., & Azuma, R. (2000). Reconfiguration of task-set: Is it easier to switch to the weaker task? *Psychological research*, 63(3), 250-264. doi:10.1007/s004269900005
- Moreno, S., Wodniecka, Z., Tays, W., Alain, C., & Bialystok, E. (2014). Inhibitory control in bilinguals and musicians: event related potential (ERP) evidence for experience-specific effects. *PloS one*, 9(4), e94169. doi:10.1371/journal.pone.0094169
- Mori, E., Hirono, N., Yamashita, H., Imamura, T., Ikejiri, Y., Ikeda, M., ... & Yoneda, Y. (1997). Premorbid brain size as a determinant of reserve capacity against intellectual decline in Alzheimer's disease. *American Journal of Psychiatry*, 154(1), 18-24. doi:10.1176/ajp.154.1.18
- Mortimer, J. A., Snowden, D. A., & Markesbery, W. R. (2003). Head circumference, education and risk of dementia: findings from the Nun Study. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 25(5), 671–679. doi:10.1076/jcen.25.5.671.14584
- Mott, K. K., Alperin, B. R., Holcomb, P. J., & Daffner, K. R. (2014). Age-related decline in differentiated neural responses to rare target versus frequent standard stimuli. *Brain research*, 1587, 97-111. doi:10.1016/j.brainres.2014.08.057
- Moulden, D. J. A., Picton, T. W., Meiran, N., Stuss, D. T., Riera, J. J., & Valdes-Sosa, P. (1998). Event-related potentials when switching attention between task-sets. *Brain and Cognition*, 37(1), 186-190. Abgerufen am 11. November, 2017, von <http://psycnet.apa.org/record/1998-04889-058>
- Näätänen, R., Gaillard, A. W., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta psychologica*, 42(4), 313-329. doi:10.1016/0001-6918(78)90006-9
- Neher, K. M., & Sowarka, D. (1999). Vergleich von zwei Kennwerten der kognitiven Plastizität bei der Früherkennung dementieller Erkrankungen. *Zeitschrift für Neuropsychologie*, 10(3), 153-167. doi:10.1024//1016-264x.10.3.153

- Neviani, F., Belvederi, Murri, M., Mussi, C., Triolo, F., Toni, G., ... & Neri, M. (2017). Physical exercise for late life depression: effects on cognition and disability. *International Psychogeriatrics*, 29(7), 1105-1112. doi:10.1017/S1041610217000576
- Newson, R. S. & Kemps E. B. (2005). General Lifestyle Activities as a Predictor of Current Cognition and Cognitive Change in Older Adults: A Cross-Sectional and Longitudinal Examination. *The Journals of Gerontology: Series B*, 60(3), 113-120. doi:10.1093/geronb/60.3.P113
- Nexø, M. A., Meng, A., & Borg, V. (2016). Can psychosocial work conditions protect against age-related cognitive decline? Results from a systematic review. *Occupational & Environmental Medicine*, 73, 487-496. doi:10.1136/oemed-2016-103550
- Ngandu, T., von Strauss, E., Helkala, E. L., Winblad, B., Nissinen, A., Tuomilehto, J., ... & Kivipelto, M. (2007). Education and dementia: What lies behind the association? *Neurology*, 69(14), 1442-1450. doi:10.1212/01.wnl.0000277456.29440.16
- Nicholson, N. R. (2012). A review of social isolation: an important but underassessed condition in older adults. *The journal of primary prevention*, 33(2-3), 137-152. doi:10.1007/s10935-012-0271-2
- Nielson, K. A., Langenecker, S. A., & Garavan, H. (2002). Differences in the functional neuroanatomy of inhibitory control across the adult life span. *Psychology and Aging*, 17(1), 56-71. doi:10.1037/0882-7974.17.1.56
- Nilsson, L. G., Sternäng, O., Rönnlund, M., & Nyberg, L. (2009). Challenging the notion of an early-onset of cognitive decline. *Neurobiology of aging*, 30(4), 521-524. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2008.11.013
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz & D. Shapiro (Hrsg.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research* (Vol. 4, S. 1–18). New York: Plenum Press.

- Nucci, M., Mapelli, D., & Mondini, S. (2012). Cognitive Reserve Index questionnaire (CRIq): a new instrument for measuring cognitive reserve. *Aging clinical and experimental research*, 24(3), 218-226. doi:10.3275/7800
- Nyberg, L. (2005). Cognitive Training in Healthy Aging: A Cognitive Neuroscience Perspective. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 309-324). Oxford: Oxford University Press.
- Nyberg, L., Lövdén, M., Riklund, K., Lindenberger, U., & Bäckman, L. (2012). Memory aging and brain maintenance. *Trends in cognitive sciences*, 16(5), 292-305. doi:10.1016/j.tics.2012.04.005
- O'Connell, R. G., Balsters, J. H., Kilcullen, S. M., Campbell, W., Bokde, A. W., Lai, R., ... & Robertson, I. H. (2012). A simultaneous ERP/fMRI investigation of the P300 aging effect. *Neurobiology of aging*, 33(10), 2448-2461. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2011.12.021
- Ojala-Oksala, J., Jokinen, H., Kopsi, V., Lehtonen, K., Luukkonen, L., Paukkunen, A., ... & Hietanen, M. (2012). Educational history is an independent predictor of cognitive deficits and long-term survival in postacute patients with mild to moderate ischemic stroke. *Stroke*, 43(11), 2931-2935. doi:10.1161/strokeaha.112.667618
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. doi:10.1016/0028-3932(71)90067-4
- Opdebeeck, C., Martyr, A., & Clare, L. (2016). Cognitive reserve and cognitive function in healthy older people: a meta-analysis. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 23(1), 40-60. doi:10.1080/13825585.2015.1041450
- Ouyang, G., Sommer, W., & Zhou, C. (2015). Updating and validating a new framework for restoring and analyzing latency-variable ERP components from single trials with residue iteration decomposition (RIDE). *Psychophysiology*, 52(6), 839-856. doi:10.1111/psyp.12411

- Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 25(1), 46-59. doi:10.1002/hbm.20131
- Paap, K. R., & Greenberg, Z. I. (2013). There is no coherent evidence for a bilingual advantage in executive processing. *Cognitive psychology*, 66(2), 232-258. doi:10.1016/j.cogpsych.2012.12.002
- Pai, M. C., & Tsai, J. J. (2005). Is cognitive reserve applicable to epilepsy? The effect of educational level on the cognitive decline after onset of epilepsy. *Epilepsia*, 46(s1), 7-10. doi:10.1111/j.0013-9580.2005.461003.x
- Pantoni, L., Inzitari, D., & Wallin, A. (2001). *The matter of white matter: Clinical and pathophysiological aspects of white matter disease related to cognitive decline and vascular dementia*. Utrecht, NL: Academic Pharmaceutical Productions.
- Park, D. C., & Gutchess, A. H. (2005). Long-Term Memory and Aging: A Cognitive Neuroscience Perspective. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 218-245). Oxford: Oxford University Press.
- Parra, M. A., Ascencio, L. L., Urquina, H. F., Manes, F., & Ibáñez, A. M. (2012). P300 and Neuropsychological Assessment in Mild Cognitive Impairment and Alzheimer Dementia. *Frontiers in Neurology*, 3, 172. doi:10.3389/fneur.2012.00172
- Patel A. D. (2009). Music and the brain: Three links to language. In Hallam S., Cross I. & Thaut, M. (Hrsg.), *The Oxford handbook of music psychology* (S. 208–216). Oxford, England: Oxford University Press.
- Peal, E., & Lambert, W. E. (1962). The relation of bilingualism to intelligence. *Psychological Monographs: General and Applied*, 76(27), 1-23. doi:10.1037/h0093840

- Pelosi, L., & Blumhardt, L. D. (1999). Effects of age on working memory: an event-related potential study. *Cognitive Brain Research*, 7(3), 321-334. doi:10.1016/S0926-6410(98)00035-4
- Pennington, B. F., Bennetto, L., McAleer, O., & Roberts, R. J., Jr. (1996). Executive functions and working memory: Theoretical and measurement issues. In G. R. Lyon & N. A. Krasnegor (Hrsg.), *Attention, memory, and executive function* (S. 327-348). Baltimore: Paul H Brookes Publishing.
- Pham, T. M., Winblad, B., Granholm, A. C., & Mohammed, A. H. (2002). Environmental influences on brain neurotrophins in rats. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 73(1), 167-175. doi:10.1016/S0091-3057(02)00783-9
- Pinto, C., & Tandel, K. Y. (2016). Cognitive reserve: Concept, determinants, and promotion. *Journal of Geriatric Mental Health*, 3(1), 44-51. doi:10.4103/2348-9995.181916
- Plassman, B. L., Welsh, K. A., Helms, M., Brandt, J., Page, W. F., & Breitner, J. C. S. (1995). Intelligence and education as predictors of cognitive state in late life A 50-year follow-up. *Neurology*, 45(8), 1446-1450. doi:10.1212/WNL.45.8.1446
- Poil, S.-S., de Haan, W., Flier, W. M. van der., Mansvelder, H. D., Scheltens, P., & Linkenkaer-Hansen, K. (2013). Integrative EEG biomarkers predict progression to Alzheimer's disease at the MCI stage. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5, 58. doi:10.3389/fnagi.2013.00058
- Poletti, M., Emre, M., & Bonuccelli, U. (2011). Mild cognitive impairment and cognitive reserve in Parkinson's disease. *Parkinsonism & related disorders*, 17(8), 579-586. doi:10.1016/j.parkreldis.2011.03.013
- Polich, J. (1996). Meta-analysis of P300 normative aging studies. *Psychophysiology*, 33(4), 334-353. doi:10.1111/j.1469-8986.1996.tb01058.x



- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128-2148. doi: 10.1016/j.clinph.2007.04.019
- Pool, L. R., Weuve, J., Wilson, R. S., Bültmann, U., Evans, D. A., & de Leon, C. F. M. (2016). Occupational cognitive requirements and late-life cognitive aging. *Neurology*, 86(15), 1386-1392. doi:10.1212/WNL.0000000000002569
- Portocarrero, J. S., Burright, R. G., & Donovan, P. J. (2007). Vocabulary and verbal fluency of bilingual and monolingual college students. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 22(3), 415-422. doi:10.1016/j.acn.2007.01.015
- Prigge, M., Liebers, F., Köhr, M., Latza, U., Pfeiffer, N., Blettner, M., ... & Seidler, A. (2014). Codierung der Tätigkeitsangaben im Basiskollektiv der Gutenberg-Gesundheitsstudie unter Anwendung der Klassifikation der Berufe KldB 2010—Darstellung des Vorgehens und der Datenqualität. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 68(3), 153-162. doi:10.1007/BF03374441
- Prior, A., & MacWhinney, B. (2010). A bilingual advantage in task switching. *Bilingualism: Language and cognition*, 13(2), 253-262. doi:10.1017/S1366728909990526
- Ragland, J. D., Turetsky, B. I., Gur, R. C., Gunning-Dixon, F., Turner, T., Schroeder, L., . . . Gur, R. E. (2002). Working memory for complex figures: An fMRI comparison of letter and fractal n-back tasks. *Neuropsychology*, 16(3), 370-379. doi:10.1037/0894-4105.16.3.370
- Rami, L., Valls-Pedret, C., Bartres-Faz, D., Caprile, C., Solé-Padullés, C., Castellvi, M., ... & Molinuevo, J. L. (2011). Cognitive reserve questionnaire. Scores obtained in a healthy elderly population and in one with Alzheimer's disease. *Revista de neurologia*, 52(4), 195-201. Abgerufen am 11. November, 2017, von <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21312165>
- Rasch, B., Frieze, M., Hofmann, W. J., & Naumann, E. (2006). *Quantitative Methoden* (Band 2, 2. Auflage). Heidelberg: Springer. Abgerufen am 11. November, 2017, von

[http://quantitative-methoden.de/Dateien/Auflage2/BdII\\_Dateien/Kapitel\\_7\\_SPSS\\_Ergaenzungen.pdf](http://quantitative-methoden.de/Dateien/Auflage2/BdII_Dateien/Kapitel_7_SPSS_Ergaenzungen.pdf)

- Raven, J. C. (1938). *Progressive Matrices: A perceptual test of intelligence*. London: H. K. Lewis.
- Raz, N. (2000). Aging of the brain and its impact on cognitive performance: Integration of structural and functional findings. In F. I. M. Craik & T. A. Salthouse (Hrsg.), *The handbook of aging and cognition* (S. 1-90). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Raz, N. (2004). The aging brain: structural changes and their implications for cognitive aging. In Dixon, R. A., Bäckman, L. & Nilsson, L-G. (Hrsg.), *New Frontiers in Cognitive Aging* (S. 115-134). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Raz, N. (2005). The aging brain observed in vivo: Differential changes and their modifiers. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 19-57). Oxford: Oxford University Press.
- Raz, N., Lindenberger, U., Rodrigue, K. M., Kennedy, K. M., Head, D., Williamson, A., ... & Acker, J. D. (2005). Regional brain changes in aging healthy adults: general trends, individual differences and modifiers. *Cerebral cortex*, 15(11), 1676-1689. doi:10.1093/cercor/bhi044
- Raz, N., Rodrigue, K. M., & Acker, J. D. (2003). Hypertension and the Brain: Vulnerability of the Prefrontal Regions and Executive Functions. *Behavioral Neuroscience*, 117(6), 1169-1180. doi:10.1037/0735-7044.117.6.1169
- Redick, T. S., Broadway, J. M., Meier, M. E., Kuriakose, P. S., Unsworth, N., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2012). Measuring working memory capacity with automated complex span tasks. *European Journal of Psychological Assessment*, 28, 164-171. doi:10.1027/1015-5759/a000123

- Redick, T. S., & Engle, R. W. (2011). Integrating working memory capacity and context-processing views of cognitive control. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(6), 1048-1055. doi:10.1080/17470218.2011.577226
- Reed, B. R., Mungas, D., Farias, S. T., Harvey, D., Beckett, L., Widaman, K., ... & DeCarli, C. (2010). Measuring cognitive reserve based on the decomposition of episodic memory variance. *Brain*, 133(8), 2196-2209. doi:10.1093/brain/awq154
- Regan, J. (1978). Involuntary automatic processing in color-naming tasks. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 24(2), 130-136. doi:10.3758/BF03199539
- Reitan, R. M., & Wolfson, D. (1994). A selective and critical review of neuropsychological deficits and the frontal lobes. *Neuropsychology review*, 4(3), 161-198. doi:10.1007/BF01874891
- Resnick, S. M., Pham, D. L., Kraut, M. A., Zonderman, A. B., & Davatzikos, C. (2003). Longitudinal magnetic resonance imaging studies of older adults: a shrinking brain. *Journal of Neuroscience*, 23(8), 3295-3301. Abgerufen am 11. November, 2017, von <http://www.jneurosci.org/content/23/8/3295.long>
- Reuter, E. M., Voelcker-Rehage, C., Vieluf, S., Lesemann, F. P., & Godde, B. (2016). The P3 parietal-to-frontal shift relates to age-related slowing in a selective attention task. *Journal of Psychophysiology*, 31, 49-66. doi:10.1027/0269-8803/a000167.
- Reuter, E. M., Voelcker-Rehage, C., Vieluf, S., Winneke, A. H., & Godde, B. (2013). A parietal-to-frontal shift in the P300 is associated with compensation of tactile discrimination deficits in late middle-aged adults. *Psychophysiology*, 50(6), 583-593. doi:10.1111/psyp.12037
- Reuter-Lorenz, P. A., & Sylvester, C. Y. C. (2005). The cognitive neuroscience of working memory and aging. In R. Cabeza, L. Nyberg & D. C. Park (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Aging: Linking Cognitive and Cerebral Aging* (S. 186-217). Oxford: Oxford University Press.

- Richardson, C., Bucks, R. S., & Hogan, A. M. (2011). Effects of aging on habituation to novelty: An ERP study. *International Journal of Psychophysiology*, 79(2), 97-105. doi:10.1016/j.ijpsycho.2010.09.007
- Ritter, W., & Vaughan, H. G. (1969). Averaged evoked responses in vigilance and discrimination: a reassessment. *Science*, 164(3877), 326-328. doi:10.1126/science.164.3877.326
- Roberts, P. M., Garcia, L. J., Desrochers, A., & Hernandez, D. (2002). English performance of proficient bilingual adults on the Boston Naming Test. *Aphasiology*, 16(4-6), 635-645. doi:10.1080/02687030244000220
- Robertson, I. H. (2013). A noradrenergic theory of cognitive reserve: implications for Alzheimer's disease. *Neurobiology of aging*, 34(1), 298-308. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2012.05.019
- Robertson, I. H. (2014). A right hemisphere role in cognitive reserve. *Neurobiology of Aging*, 35(6), 1375-1385. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2013.11.028
- Roe, C. M., Mintun, M. A., D'Angelo, G., Xiong, C., Grant, E. A., & Morris, J. C. (2008). Alzheimer disease and cognitive reserve: variation of education effect with carbon 11-labeled Pittsburgh Compound B uptake. *Archives of neurology*, 65(11), 1467-1471. doi:10.1001/archneur.65.11.1467
- Roe, C. M., Xiong, C., Miller, J. P., & Morris, J. C. (2007). Education and Alzheimer disease without dementia support for the cognitive reserve hypothesis. *Neurology*, 68(3), 223-228. doi:10.1212/01.wnl.0000251303.50459.8a
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(2), 207-231. doi:10.1037/0096-3445.124.2.207
- Rönnlund, M., Nyberg, L., Bäckman, L., & Nilsson, L.-G. (2005). Stability, Growth, and Decline in Adult Life Span Development of Declarative Memory: Cross-Sectional and

- Longitudinal Data From a Population-Based Study. *Psychology and Aging*, 20(1), 3-18.  
doi:10.1037/0882-7974.20.1.3
- Roselli, F., Tartaglione, B., Federico, F., Lepore, V., Defazio, G., & Livrea, P. (2009). Rate of MMSE score change in Alzheimer's disease: influence of education and vascular risk factors. *Clinical neurology and neurosurgery*, 111(4), 327-330. doi:10.1016/j.clineuro.2008.10.006
- Rosen, V. M., Bergeson, J. L., Putnam, K., Harwell, A., & Sunderland, T. (2002). Working memory and apolipoprotein E: what's the connection? *Neuropsychologia*, 40(13), 2226-2233. doi:10.1016/S0028-3932(02)00132-X
- Rosen, A. C., Prull, M. W., O'hara, R., Race, E. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., ... & Gabrieli, J. D. (2002). Variable effects of aging on frontal lobe contributions to memory. *Neuroreport*, 13(18), 2425-2428. doi:10.1097/00001756-200212200-00010
- Rosenkranz, K., Williamon, A., & Rothwell, J. C. (2007). Motorcortical excitability and synaptic plasticity is enhanced in professional musicians. *Journal of Neuroscience*, 27(19), 5200-5206. doi:10.1523/JNEUROSCI.0836-07.2007
- Rossini, P. M., Rossi, S., Babiloni, C., & Polich, J. (2007). Clinical neurophysiology of aging brain: from normal aging to neurodegeneration. *Progress in neurobiology*, 83(6), 375-400. doi:10.1016/j.pneurobio.2007.07.010
- Roth, A. (2007). *Intraindividuelle Variabilität von Reaktionszeiten und ereigniskorrelierten Potentialen bei Patienten mit Schizophrenie und gesunden Probanden* (Dissertation), Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. doi:10.11588/heidok.00008208
- Rypma, B., & D'Esposito, M. (2000). Isolating the neural mechanisms of age-related changes in human working memory. *Nature neuroscience*, 3(5), 509-515. doi:10.1038/74889
- Rypma, B., Prabhakaran, V., Desmond, J. E., & Gabrieli, J. D. E. (2001). Age differences in prefrontal cortical activity in working memory. *Psychology and Aging*, 16(3), 371-384. doi:10.1037/0882-7974.16.3.371

- Sachdev, P. S., & Valenzuela, M. (2009). Brain and cognitive reserve. *The American Journal of Geriatric Psychiatry*, 17(3), 175-178. doi:10.1097/JGP. 0b013e318196a661
- Sakamoto, M., Woods, S. P., Kolessar, M., Kriz, D., Anderson, J. R., Olavarria, H., ... & Huckans, M. (2013). Protective effects of higher cognitive reserve for neuropsychological and daily functioning among individuals infected with hepatitis C. *Journal of neurovirology*, 19(5), 442-451. doi:10.1007/s13365-013-0196-4
- Saliasi, E., Geerligs, L., Lorist, M. M., & Maurits, N. M. (2013). The relationship between P3 amplitude and working memory performance differs in young and older adults. *PLoS One*, 8(5), e63701. doi:10.1371/journal.pone.0063701
- Salkind, N. J. (2017). *Statistics for people who (think they) hate statistics* (6<sup>th</sup> ed.). Los Angeles, CA: Sage Publications.
- Salthouse, T. A. (1979). Adult age and the speed-accuracy trade-off. *Ergonomics*, 22(7), 811-821. doi:10.1080/00140137908924659
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103(3), 403-428. doi:10.1037/0033-295X.103.3.403
- Salthouse, T. A. (2004). Localizing age-related individual differences in a hierarchical structure. *Intelligence*, 32(6), 541-561. doi:10.1016/j.intell.2004.07.003
- Salthouse, T. A. (2009). When does age-related cognitive decline begin? *Neurobiology of aging*, 30(4), 507-514. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2008.09.023
- Salthouse, T. A., Atkinson, T. M., & Berish, D. E. (2003). Executive Functioning as a Potential Mediator of Age-Related Cognitive Decline in Normal Adults. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132(4), 566-594. doi:10.1037/0096-3445.132.4.566
- Sattler, C. (2011). *Kognitive Reserve im Alter – Wechselwirkungen neuropsychologischer, sozialer und neurobiologischer Faktoren im Vorfeld dementieller Erkrankungen. Eine*

- Analyse im Rahmen der Interdisziplinären Längsschnittstudie des Erwachsenenalters (ILSE)* (Dissertation), Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. doi:10.11588/heidok.00013081
- Satz, P., Cole, M. A., Hardy, D. J., & Rassovsky, Y. (2011). Brain and cognitive reserve: mediator(s) and construct validity, a critique. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 33(1), 121-130. doi:10.1080/13803395.2010.493151
- Scahill, R. I., Frost, C., Jenkins, R., Whitwell, J. L., Rossor, M. N., & Fox, N. C. (2003). A longitudinal study of brain volume changes in normal aging using serial registered magnetic resonance imaging. *Archives of neurology*, 60(7), 989-994. doi:10.1001/archneur.60.7.989
- Scarmeas, N., Levy, G., Tang, M., Manly, J., & Stern, Y. (2001). Influence of leisure activity on the incidence of Alzheimers Disease. *Neurology*, 57(12), 2236-2242. doi:10.1212/wnl.57.12.2236
- Scarmeas, N., & Stern, Y. (2003). Cognitive reserve and lifestyle. *Journal of clinical and experimental neuropsychology*, 25(5), 625-633. doi:10.1076/jcen.25.5.625. 14576
- Scarmeas, N., Zarahn, E., Anderson, K. E., Habeck, C. G., Hilton, J., Flynn, J., ... & Moeller, J. R. (2003). Association of life activities with cerebral blood flow in Alzheimer disease: implications for the cognitive reserve hypothesis. *Archives of Neurology*, 60(3), 359-365. doi:10.1001/archneur.60.3.359
- Schaie, K. W. (1996). *Intellectual development in adulthood: The Seattle longitudinal study*. Cambridge University Press.
- Schaie, K. W. (2004). Cognitive Aging. In R. W. Pew & S. B. Hemel van. (Hrsg.), *Technology for adaptive aging* (S. 43–63). Washington, D.C.: National Academies Press. doi:10.17226/10857

- Schaie, K. W. (2005). What Can We Learn From Longitudinal Studies of Adult Development? *Research in Human Development*, 2(3), 133–158. doi:10.1207/s15427617rhd0203\_4
- Schaie, K.W. (2010). Adult Cognitive Development from a Lifespan Developmental Perspective. 明星大学心理学年報, 28, 021–035. Abgerufen am 11. November, 2017, von [http://www.hino.meisei-u.ac.jp/psy/\\_userdata/Schaie.pdf](http://www.hino.meisei-u.ac.jp/psy/_userdata/Schaie.pdf)
- Schapkin, S. A. (2012). *Altersbezogene Änderungen kognitiver Fähigkeiten-kompensatorische Prozesse und physiologische Kosten*. Dortmund: BAuA.
- Schapkin, S. A., & Freude, G. (2014). Neuronal mechanisms of working memory performance in younger and older employees. In D. Harris (Hrsg.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (LNAI 8532, S. 70–81). Heidelberg: Springer.
- Schapkin, S. A., Gajewski, P. D., & Freude, G. (2014). Age differences in memory-based task switching with and without cues. *Journal of Psychophysiology*, 28, 187-201. doi:10.1027/0269-8803/a000125
- Schapkin, S. A., & Weißbecker-Klaus, X. (2015). Test battery for assessment of cognitive function in older employees: performance, brain processes, and cardiovascular „costs“. In *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 7. ACM. doi:10.1145/2769493.2769553
- Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological science*, 15(8), 511-514. doi:10.1111/j.0956-7976.2004.00711.x
- Schellenberg, E. G. (2006). Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, 98(2), 457-468. doi:10.1037/0022-0663.98.2.457
- Schlaug, G., Norton, A., Overy, K., & Winner, E. (2005). Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 219-230. doi:10.1196/annals.1360.015



- Schmitt, H., Wolff, M. C., Ferdinand, N. K., & Kray, J. (2014). Age differences in the processing of context information: Is it age or is it performance? *Journal of Psychophysiology*, 28, 202–214. doi:10.1027/0269-8803/a000126
- Schofield, P. W., Logroscino, G., Andrews, H. F., Albert, S., & Stern, Y. (1997). An association between head circumference and Alzheimer's disease in a population-based study of aging and dementia. *Neurology*, 49(1), 30-37. doi:10.1212/wnl.49.1.30
- Schooler, C., & Mulatu, M. S. (2001). The reciprocal effects of leisure time activities and intellectual functioning in older people: a longitudinal analysis. *Psychology and aging*, 16(3), 466-482. doi:10.1037/0882-7974.16.3.466
- Schooler, C., Mulatu, M. S., & Oates, G. (1999). The continuing effects of substantively complex work on the intellectual functioning of older workers. *Psychology and aging*, 14(3), 483-506. doi:10.1037//0882-7974.14.3.483
- Schröder, H., Schiel, St., Schulz, S., & Kleudgen, M. (2015). *Mentale Gesundheit bei der Arbeit (S-MGA), Methodenbericht zur Repräsentativerhebung an Erwerbstätigen in Deutschland* (2. überarb. Aufl.). Dortmund: BAuA.
- Schweizer, T. A., Ware, J., Fischer, C. E., Craik, F. I., & Bialystok, E. (2012). Bilingualism as a contributor to cognitive reserve: Evidence from brain atrophy in Alzheimer's disease. *Cortex*, 48(8), 991-996. doi:10.1016/j.cortex.2011.04.009
- Seeman, T. E. (1996). Social ties and health: The benefits of social integration. *Annals of epidemiology*, 6(5), 442-451. doi:10.1016/S1047-2797(96)00095-6
- Seeman, T. (2001). How do others get under our skin? Social relationships and health. In C. D. Ryff & B. H. Singer (Hrsg.), *Series in affective science. Emotion, social relationships, and health* (S. 189-210). doi:10.1093/acprof:oso/9780195145410.003.0006
- Seeman, T. E., Lusignolo, T. M., Albert, M., & Berkman, L. (2001). Social relationships, social support, and patterns of cognitive aging in healthy, high-functioning older adults:

- MacArthur Studies of Successful Aging. *Health Psychology*, 20(4), 243-255.  
doi:10.1037/0278-6133.20.4.243
- Seeman, T. E., & McEwen, B. S. (1996). Impact of social environment characteristics on neuroendocrine regulation. *Psychosomatic medicine*, 58(5), 459-471.  
doi:10.1097/00006842-199609000-00008
- Seeman, T. E., Miller-Martinez, D. M., Stein Merkin, S., Lachman, M. E., Tun, P. A., & Karlamangla, A. S. (2011). Histories of social engagement and adult cognition: Midlife in the US study. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 66(1), i141-i152. doi:10.1093/geronb/gbq091
- Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., ... & Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(5), 721-733. doi:10.1016/j.neubiorev.2009.10.005
- Seinfeld, S., Figueroa, H., Ortiz-Gil, J., & Sanchez-Vives, M. V. (2013). Effects of music learning and piano practice on cognitive function, mood and quality of life in older adults. *Frontiers in Psychology*, 4, 810. doi:10.3389/fpsyg.2013.00810
- Shahin, A. J. (2011). Neurophysiological Influence of Musical Training on Speech Perception. *Frontiers in Psychology*, 2, 126. doi:10.3389/fpsyg.2011.00126
- Shallice, T. I. M., & Burgess, P. W. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, 114(2), 727-741. doi:10.1093/brain/114.2.727
- Shallice, T., & Warrington, E. K. (1970). Independent functioning of verbal memory stores: A neuropsychological study. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 22(2), 261-273. doi:10.1080/00335557043000203
- Shor, R. E. (1971). Symbol processing speed differences and symbol interference effects in a variety of concept domains. *The Journal of General Psychology*, 85(2), 187-205.  
doi:10.1080/00221309.1971.9920672

- Siedlecki, K. L., Stern, Y., Reuben, A., Sacco, R. L., Elkind, M. S., & Wright, C. B. (2009). Construct validity of cognitive reserve in a multiethnic cohort: The Northern Manhattan Study. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15(4), 558-569. doi:10.1017/S1355617709090857
- Singer, T., & Lindenberger, U. (2000). Plastizität. In H.-W. Wahl & C. Tesch-Römer (Hrsg.), *Angewandte Gerontologie in Schlüsselbegriffen* (S. 39–43). Stuttgart: Kohlhammer.
- Singh-Manoux, A., Kivimaki, M., Glymour, M. M., Elbaz, A., Berr, C., Ebmeier, K. P., ... & Dugravot, A. (2012). Timing of onset of cognitive decline: results from Whitehall II prospective cohort study. *Bmj*, 344, d7622. doi:10.1136/bmj.d7622
- Sluming, V., Barrick, T., Howard, M., Cezayirli, E., Mayes, A., & Roberts, N. (2002). Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians. *Neuroimage*, 17(3), 1613-1622. doi:10.1006/nimg.2002.1288
- Small, B. J., Fratiglioni, L., Viitanen, M., Winblad, B., & Bäckman, L. (2000). The course of cognitive impairment in preclinical Alzheimer disease: three-and 6-year follow-up of a population-based sample. *Archives of neurology*, 57(6), 839-844. doi:10.1001/archneur.57.6.839
- Smart, C. M., Segalowitz, S. J., Mulligan, B. P., & MacDonald, S. W. (2014). Attention capacity and self-report of subjective cognitive decline: A P3 ERP study. *Biological psychology*, 103, 144-151. doi:10.1016/j.biopsycho.2014.08.016
- Smith, G. A., & Brewer, N. (1995). Slowness and age: Speed-accuracy mechanisms. *Psychology and Aging*, 10(2), 238-247. doi:10.1037/0882-7974.10.2.238
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408), 1657-1661. doi:10.1126/science.283.5408.1657

- Smith, E. E., & Kosslyn, S. M. (2007). *Cognitive Psychology: Mind and Brain*. New Jersey: Prentice Hall.
- Snyder, J. S., & Alain, C. (2005). Age-related changes in neural activity associated with concurrent vowel segregation. *Cognitive Brain Research*, 24(3), 492-499. doi:10.1016/j.cogbrainres.2005.03.002
- Solé-Padullés, C., Bartrés-Faz, D., Junqué, C., Vendrell, P., Rami, L., Clemente, I. C., ... & Barrios, M. (2009). Brain structure and function related to cognitive reserve variables in normal aging, mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Neurobiology of aging*, 30(7), 1114-1124. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2007.10.008
- Sörman, A. H., & Giampietro, M. (2013). The energetic metabolism of societies and the degrowth paradigm: analyzing biophysical constraints and realities. *Journal of Cleaner Production*, 38, 80-93. doi:10.1093/geronb/gbt056
- Sowarka, D., Neher, K. M., Gutzmann, H., Köhl, K., & Baltes, M. (2000). Kognitive Plastizität als Diagnostikum zur Früherkennung pathologischen Alterns. *Zeitschrift für Diffentielle und Diagnostische Psychologie*, 21(2), 125-137. doi:10.1024//0170-1789.21.2.125
- Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature neuroscience*, 6(3), 309-315. doi:10.1038/nn1008
- Spector, A., & Biederman, I. (1976). Mental set and mental shift revisited. *The American Journal of Psychology*, 89(4), 669-679. doi:10.2307/1421465
- Speer, M. E., & Soldan, A. (2015). Cognitive reserve modulates ERPs associated with verbal working memory in healthy younger and older adults. *Neurobiology of aging*, 36(3), 1424-1434. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2014.12.025

- Statistisches Bundesamt (2015). 13 koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland. Abgerufen am 07. September, 2017, von <https://service.destatis.de/bevoelkerungspyramide/#!y=2017>
- Steffener, J., & Stern, Y. (2012). Exploring the Neural Basis of Cognitive Reserve in Aging. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1822(3), 467–473. doi:10.1016/j.bbadis.2011.09.012
- Stern, Y. (2002). What is cognitive reserve? Theory and research application of the reserve concept. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 8, 448–460. doi:10.1017/S1355617702813248
- Stern, Y. (2006). Cognitive Reserve and Alzheimer Disease. *Alzheimer disease and associated disorders*, 20(2), 69–74. doi:10.1097/01.wad.0000213815.20177.19
- Stern, Y. (2009). Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47, 2015–2028. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.004
- Stern, Y. (2012). Cognitive reserve in ageing and Alzheimer's disease. *Lancet Neurology*, 11(11), 1006–1012. doi:10.1016/S1474-4422(12)70191-6
- Stern, Y. (2013). Cognitive Reserve: Implications for Assessment and Intervention. *Folia Phoniatica et Logopaedica: Official Organ of the International Association of Logopedics and Phoniatrics (IALP)*, 65(2), 49–54. doi:10.1159/000353443
- Stern, Y., Rakitin, B. C., Habeck, C., Gazes, Y., Steffener, J., Kumar, A., & Reuben, A. (2012). Task difficulty modulates young - old differences in network expression. *Brain Research*, 1435, 130–145. doi:10.1016/j.brainres.2011.11.061
- Stern, Y., Scarmeas, N., & Habeck, C. (2004). Imaging cognitive reserve. *International Journal of psychology*, 39(1), 18–26. doi:10.1080/00207590344000259
- Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *Science*, 153(3736), 652–654. doi:10.1126/science.153.3736.652

- Stine-Morrow, E. A. L., Parisi, J. M., Morrow, D. G., & Park, D. C. (2008). The Effects of an Engaged Lifestyle on Cognitive Vitality: A Field Experiment. *Psychology and Aging*, 23(4), 778–786. doi:10.1037/a0014341
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662. doi:10.1037/h0054651
- Stuss, D. T., & Benson, D. F. (1986). *The frontal lobes*. New York: Raven Press.
- Sumowski, J. F., Rocca, M. A., Leavitt, V. M., Dackovic, J., Mesaros, S., Drulovic, J., ... & Filippi, M. (2014). Brain reserve and cognitive reserve protect against cognitive decline over 4.5 years in MS. *Neurology*, 82(20), 1776-1783. doi:10.1212/WNL.0000000000000433
- Sumowski, J. F., Wylie, G. R., Gonnella, A., Chiaravalloti, N., & Deluca, J. (2010). Premorbid cognitive leisure independently contributes to cognitive reserve in multiple sclerosis. *Neurology*, 75(16), 1428-1431. doi:10.1212/WNL.0b013e3181f881a6
- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150(3700), 1187-1188. doi:10.1126/science.150.3700.1187
- Tao, L., Marzecová, A., Taft, M., Asanowicz, D., & Wodniecka, Z. (2011). The Efficiency of Attentional Networks in Early and Late Bilinguals: The Role of Age of Acquisition. *Frontiers in Psychology*, 2, 123. doi:10.3389/fpsyg.2011.00123
- Tatti, E., Rossi, S., Innocenti, I., Rossi, A., & Santarnecchi, E. (2016). Non-invasive brain stimulation of the aging brain: State of the art and future perspectives. *Ageing research reviews*, 29, 66–89. doi:10.1016/j.arr.2016.05.006
- Then, F. S., Luck, T., Luppa, M., Thinschmidt, M., Deckert, S., Nieuwenhuijsen, K., ... & Riedel-Heller, S. G. (2014). Systematic review of the effect of the psychosocial working environment on cognition and dementia. *Occupational & Environmental Medicine*, 71, 358-365. doi:10.1136/oemed-2013-101760

- Tucker, A. M., & Stern, Y. (2011). Cognitive reserve in aging. *Current Alzheimer Research*, 8(4), 354-360. doi:10.2174/156720511795745320
- Tucker-Drob, E. M., Johnson, K. E., & Jones, R. N. (2009). The cognitive reserve hypothesis: A longitudinal examination of age-associated declines in reasoning and processing speed. *Developmental Psychology*, 45(2), 431-446. doi:10.1037/a0014012
- Turner, M. L., & Engle, R. W. (1989). Is working memory capacity task dependent? *Journal of memory and language*, 28(2), 127-154. doi:10.1016/0749-596X(89)90040-5
- Unsworth, N., Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2014). Working memory and fluid intelligence: Capacity, attention control, and secondary memory retrieval. *Cognitive psychology*, 71, 1-26. doi:10.1016/j.cogpsych.2014.01.003
- Unsworth, N., Heitz, R. P., Schrock, J. C., & Engle, R. W. (2005). An automated version of the operation span task. *Behavior research methods*, 37(3), 498-505. doi:10.3758/BF03192720
- Valenzuela, M., Brayne, C., Sachdev, P., Wilcock, G., & Matthews, F. (2011). Cognitive lifestyle and long-term risk of dementia and survival after diagnosis in a multicenter population-based cohort. *American journal of epidemiology*, 173(9), 1004-1012. doi:10.1093/aje/kwq476
- Valenzuela, M. J., Breakspear, M., & Sachdev, P. (2007). Complex mental activity and the aging brain: molecular, cellular and cortical network mechanisms. *Brain Research Reviews*, 56(1), 198-213. doi:10.1016/j.brainresrev.2007.07.007
- Valenzuela, M. J., & Sachdev, P. (2006). Brain reserve and dementia: a systematic review. *Psychological medicine*, 36(4), 441-454. doi:10.1017/ S0033291705006264
- Valenzuela, M. J., & Sachdev, P. (2007). Assessment of complex mental activity across the lifespan: development of the Lifetime of Experiences Questionnaire (LEQ). *Psychological medicine*, 37(7), 1015-1025. doi:10.1017/ S003329170600938X

- Vance, D. E., Kaur, J., Fazeli, P. L., Talley, M. H., Yuen, H. K., Kitchin, B., & Lin, F. (2012). Neuroplasticity and successful cognitive aging: a brief overview for nursing. *Journal of Neuroscience Nursing*, 44(4), 218-227. doi:10.1097/JNN.0b013e3182527571
- Vega-Mendoza, M., West, H., Sorace, A., & Bak, T. H. (2015). The impact of late, non-balanced bilingualism on cognitive performance. *Cognition*, 137, 40-46. doi:10.1016/j.cognition.2014.12.008
- Verghese, J., LeValley, A., Derby, C., Kuslansky, G., Katz, M., Hall, C., ... & Lipton, R. B. (2006). Leisure activities and the risk of amnesic mild cognitive impairment in the elderly. *Neurology*, 66(6), 821-827. doi:10.1212/01.wnl.0000202520.68987.48
- Verghese, J., Lipton, R. B., Katz, M. J., Hall, C. B., Derby, C. A., Kuslansky, G., ... & Buschke, H. (2003). Leisure activities and the risk of dementia in the elderly. *New England Journal of Medicine*, 348(25), 2508-2516. doi:10.1056/NEJMoa022252
- Verhaeghen, P., & Marcoen, A. (1996). On the mechanisms of plasticity in young and older adults after instruction in the method of loci: Evidence for an amplification model. *Psychology and Aging*, 11(1), 164-178. doi:10.1037/0882-7974.11.1.164
- Verleger, R., Neukäter, W., Kömpf, D., & Vieregge, P. (1991). On the reasons for the delay of P3 latency in healthy elderly subjects. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 79(6), 488-502. doi:10.1016/0013-4694(91)90168-4
- Verleger, R. (1997). On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. *Psychophysiology*, 34(2), 131-156. doi:10.1111/j.1469-986.1997.tb02125.x
- Walhovd, K. B., Fjell, A. M., Reinvang, I., Lundervold, A., Fischl, B., Quinn, B. T., ... & Dale, A. M. (2006). The functional and structural significance of the frontal shift in the old/new ERP effect. *Brain research*, 1081(1), 156-170. doi:10.1016/j.brainres.2006.01.076



- Walhovd, K. B., Rosquist, H., & Fjell, A. M. (2008). P300 amplitude age reductions are not caused by latency jitter. *Psychophysiology*, 45(4), 545-553. doi:10.1111/j.1469-8986.2008.00661.x
- Wan, C. Y., & Schlaug, G. (2010). Music Making as a Tool for Promoting Brain Plasticity across the Life Span. *The Neuroscientist*, 16(5), 566-577. doi:10.1177/1073858410377805
- Wang, H. X., Jin, Y., Hendrie, H. C., Liang, C., Yang, L., Cheng, Y., ... & Kritchevsky, S. (2012). Late life leisure activities and risk of cognitive decline. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, 68(2), 205-213. doi:10.1093/gerona/gls153
- Wang, H. X., Karp, A., Winblad, B., & Fratiglioni, L. (2002). Late-life engagement in social and leisure activities is associated with a decreased risk of dementia: a longitudinal study from the Kungsholmen project. *American journal of epidemiology*, 155(12), 1081-1087. doi:10.1093/aje/155.12.1081
- Wang, H. X., Xu, W., & Pei, J. J. (2012). Leisure activities, cognition and dementia. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease*, 1822(3), 482-491. doi:10.1016/j.bbadis.2011.09.002
- Wecker, N. S., Kramer, J. H., Wisniewski, A., Delis, D. C., & Kaplan, E. (2000). Age effects on executive ability. *Neuropsychology*, 14(3), 409-414. doi:10.1037/0894-4105.14.3.409
- Weisz, J., & Czigler, I. (2006). Age and novelty: Event-related brain potentials and autonomic activity. *Psychophysiology*, 43(3), 261-271. doi:10.1111/j.14698986.2006.00395.x
- Weldon, R. B., Mushlin, H., Kim, B., & Sohn, M. H. (2013). The effect of working memory capacity on conflict monitoring. *Acta psychologica*, 142(1), 6-14. doi:10.1016/j.actpsy.2012.10.002

- West R. L. (1996). An application of prefrontal cortex function theory to cognitive aging. *Psychological bulletin*, 120, 272–292. doi:10.1037/0033-2909.120.2.272
- West, R., Schwarb, H., & Johnson, B. N. (2010). The influence of age and individual differences in executive function on stimulus processing in the oddball task. *Cortex*, 46(4), 550-563. doi:10.1016/j.cortex.2009.08.001
- Whalley, L. J., Starr, J. M., Athawes, R., Hunter, D., Pattie, A., & Deary, I. J. (2000). Childhood mental ability and dementia. *Neurology*, 55(10), 1455-1459. doi:10.1212/wnl.55.10.1455
- White-Schwoch, T., Carr, K. W., Anderson, S., Strait, D. L., & Kraus, N. (2013). Older adults benefit from music training early in life: biological evidence for long-term training-driven plasticity. *Journal of Neuroscience*, 33(45), 17667-17674. doi:10.1523/JNEUROSCI.2560-13.2013
- Wickens, C. D., Hyman, F., Dellinger, J., Taylor, H., & Meador, M. (1986). The Sternberg memory search task as an index of pilot workload. *Ergonomics*, 29(11), 1371-1383. doi:10.1080/00140138608967252
- Wickens, C. D., Sandry, D. L., & Vidulich, M. (1983). Compatibility and resource competition between modalities of input, central processing, and output. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 25(2), 227-248. doi:10.1177/001872088302500209
- Wild-Wall, N., Falkenstein, M., & Gajewski, P. D. (2011). Age-Related Differences in Working Memory Performance in a 2-Back Task. *Frontiers in Psychology*, 2, 186. doi:10.3389/fpsyg.2011.00186
- Wild-Wall, N., Gajewski, P., & Falkenstein, M. (2009). Kognitive leistungsfähigkeit älterer arbeitnehmer. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 42(4), 299-304. doi:10.1007/s00391-009-0045-5

- Willis, S. L. (1991). Cognition and everyday competence. In Schaie K. W. & Lawton M. P. (Hrsg.), *Annual review of gerontology and geriatrics* (Vol. 11, S. 80–109). New York: Springer.
- Wilson, R. S., Bennett, D. A., Gilley, D. W., Beckett, L. A., Barnes, L. L., & Evans, D. A. (2000). Premorbid reading activity and patterns of cognitive decline in Alzheimer disease. *Archives of Neurology*, 57(12), 1718-1723. doi:10.1001/archneur.57.12.1718
- Wilson, R. S., De Leon, C. F. M., Barnes, L. L., Schneider, J. A., Bienias, J. L., Evans, D. A., & Bennett, D. A. (2002). Participation in cognitively stimulating activities and risk of incident Alzheimer disease. *Jama*, 287(6), 742-748. doi:10.1001/jama.287.6.742
- Wilson, R. S., Krueger, K. R., Arnold, S. E., Schneider, J. A., Kelly, J. F., Barnes, L. L., ... & Bennett, D. A. (2007). Loneliness and risk of Alzheimer disease. *Archives of general psychiatry*, 64(2), 234-240. doi:10.1001/archpsyc.64.2.234
- Wong, A., Lau, A. Y. L., Lo, E., Tang, M., Wang, Z., Liu, W., ... Mok, V. C. T. (2016). Relations between Recent Past Leisure Activities with Risks of Dementia and Cognitive Functions after Stroke. *PLoS ONE*, 11(7), e0159952. doi:10.1371/journal.pone.0159952
- Woumans, E., Santens, P., Sieben, A., Versijpt, J. A. N., Stevens, M., & Duyck, W. (2015). Bilingualism delays clinical manifestation of Alzheimer's disease. *Bilingualism: Language and Cognition*, 18(3), 568-574. doi:10.1017/S136672891400087X
- Wronka, E., Kaiser, J., & Coenen, A. M. (2013). Psychometric intelligence and P3 of the event-related potentials studied with a 3-stimulus auditory oddball task. *Neuroscience letters*, 535, 110-115. doi:10.1016/j.neulet.2012.12.012
- Xu, W., Yu, J. T., Tan, M. S., & Tan, L. (2015). Cognitive reserve and Alzheimer's disease. *Molecular neurobiology*, 51(1), 187-208. doi:10.1007/s12035-014-8720-y
- Ybarra, O., Burnstein, E., Winkielman, P., Keller, M. C., Manis, M., Chan, E., & Rodriguez, J. (2008). Mental exercising through simple socializing: Social interaction

- promotes general cognitive functioning. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 34(2), 248-259. doi:10.1177/0146167207310454
- Zahodne, L. B., Schofield, P. W., Farrell, M. T., Stern, Y., & Manly, J. J. (2014). Bilingualism does not alter cognitive decline or dementia risk among Spanish-speaking immigrants. *Neuropsychology*, 28(2), 238-246. doi:10.1037/neu0000014
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: auditory–motor interactions in music perception and production. *Nature reviews neuroscience*, 8(7), 547-558. doi:547-558. 10.1038/nrn2152
- Ziegler, D. A., Piguet, O., Salat, D. H., Prince, K., Connally, E., & Corkin, S. (2010). Cognition in healthy aging is related to regional white matter integrity, but not cortical thickness. *Neurobiology of Aging*, 31(11), 1912–1926. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2008.10.015
- Zihl, J., Fink, T., Pargent, F., Ziegler, M., & Bühner, M. (2014). Cognitive reserve in young and old healthy subjects: differences and similarities in a testing-the-limits paradigm with DSST. *PloS one*, 9(1), e84590. doi:10.1371/journal.pone.0084590
- Zunzunegui, M. V., Alvarado, B. E., Del Ser, T., & Otero, A. (2003). Social networks, social integration, and social engagement determine cognitive decline in community-dwelling Spanish older adults. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 58(2), 93-100. doi:10.1093/geronb/58.2.S93
- Zurrón, M., Lindín, M., Galdo-Alvarez, S., & Díaz, F. (2014). Age-related effects on event-related brain potentials in a congruence/incongruence judgment color-word Stroop task. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, 128. doi:10.3389/fnagi.2014.00128

# Anhang

## Anhang A. Informationsschreiben 2013

Sehr geehrte Teilnehmer der Studie zur Mentalen Gesundheit bei der Arbeit (S-MGA),  
für Ihre Bereitschaft, an der arbeitsmedizinischen Zusatzuntersuchung im Rahmen der Studie zur Mentalen Gesundheit bei der Arbeit (S-MGA) teilzunehmen, bedanken wir uns herzlich.

Wie angekündigt, werden verschiedene Bereiche der körperlichen, der mentalen und der psychosozialen Leistungsfähigkeit untersucht. In einem anschließenden Gespräch werden Ihnen die Untersuchungsergebnisse und Hinweise zum Erhalt Ihrer Gesundheit zurückgemeldet.

Die Untersuchungszeit beläuft sich auf 90 bis 120 Minuten und wird mit 100 Euro vergütet.

Darüber hinaus hat sich eine weitere - einmalige – Möglichkeit ergeben, an einer zusätzlichen ca. 4-stündigen Untersuchung zur geistigen Leistungsfähigkeit teilzunehmen. Dabei werden gleichzeitig mit der Bearbeitung von Aufgaben am PC auch physiologische Kenngrößen, wie z.B. der Blutdruck und die elektrische Aktivität des Gehirns mittels Elektroenzephalogramm (EEG) gemessen. Die Erfassung des EEG erfolgt über Messungen an der Kopfhaut. Dafür sind keine gesonderten körperlichen Eingriffe erforderlich.

Sollten Sie sich für beide Untersuchungen entscheiden, erhöht sich die Aufwandsentschädigung auf insgesamt 200 Euro. In diesem Fall werden beide Untersuchungsblöcke durch eine Pause getrennt, in der Sie sich mit einem kalten Büffet stärken können.

Das für die Durchführung der Experimente zuständige Fachpersonal der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) wird Sie in den kommenden Wochen telefonisch kontaktieren, um Sie über den weiteren Ablauf zu informieren und diesen mit Ihnen abzustimmen.

Sollten Sie vorab bereits Fragen haben, so können Sie sich gerne an uns wenden:

Tel. 030- xxxxxxxxx oder 030-xxxxxxx

Email: xxxxxxxxx@baua.bund.de

Wir bedanken uns noch einmal sehr herzlich für Ihr Interesse und würden uns sehr freuen, Sie in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin begrüßen zu können.

## **Anhang B. Ausschlusskriterien**

1. Bluthochdruck oder blutdrucksenkende Medikamente
2. Sonstige Herz-Kreislauf-Erkrankungen
3. Schädel-Hirn-Trauma/ Gehirnerschütterung in den letzten 10 Jahren
4. Neurologische Erkrankungen
5. Psychiatrische Erkrankungen
6. Chronische Erkrankungen
7. Operationen in den letzten 6 Monaten
8. (schmerzhafte) Bewegungseinschränkungen
9. Regelmäßige Medikamenteneinnahme (insb. zentral wirksame Medikamente)
10. Metallimplantate
11. Nicht durch Brille/Kontaktlinsen korrigierte Sehschwäche
12. Hauterkrankungen
13. Bekannte Pflaster- oder Desinfektionsmittelallergie

## Anhang C. Fragebogen zur Erfassung der CR (2013)

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre **Freizeitgestaltung in den letzten 4 Wochen**. Wenn Sie nun einmal an diese Zeit denken:

Wie viele Stunden hatten Sie schätzungsweise für Aktivitäten außerhalb Ihrer Arbeits- bzw. Berufstätigkeit? \_\_\_\_\_ Stunden

Nun schätzen Sie bitte, **wie viele Stunden** Sie in diesen **4 Wochen** für folgende Aktivitäten genutzt haben. Bitte geben Sie nur ganze Stunden an!

| Aktivität   | Stunden |
|---|---------|
| Besuch von Kulturveranstaltungen (z.B. Museen, Theatern, Opern)   |         |
| Teilnahme an Kursen, in denen neue Fähigkeiten und/oder Fertigkeiten vermittelt werden (z.B. Computerkurs, Sprachkurs, Tanzkurs)    |         |
| Besuch von Informationsveranstaltungen (z.B. Vorträge, Vorlesungen, Kongresse)  |         |
| Besuch einer Bibliothek   |         |
| Lesen von Büchern und/oder Zeitschriften  |         |
| Arbeit mit Computerprogrammen, die nichts mit Unterhaltung zu tun haben (z.B. Office-Anwendungen, Foto-/Video-Bearbeitungssoftware) |         |
| Beschäftigung mit Kreuzworträtseln, Sudoku etc.   |         |
| Hören von Radio-Wortsendungen und Hörspielen  |         |
| Ansehen von Fernsehdokumentationen  |         |

Bitte schätzen Sie auch hier, **wie viele Stunden** Sie in den **letzten 4 Wochen** für folgende Aktivitäten genutzt haben:

| Aktivität   | Stunden |
|---|---------|
| Private Besuche machen oder bekommen  |         |
| Soziale Netzwerke nutzen (z.B. Facebook, Twitter) und/oder private Emails lesen/beantworten |         |
| Zusammen mit Anderen einen Einkaufsbummel machen  |         |
| Zum Essen ausgehen  |         |
| Besuch von Diskotheken/Clubs/Bars/Kneipen   |         |
| Telefonieren  |         |

Wie oft üben Sie die folgenden Aktivitäten **in Ihrer Freizeit** aus?

|  | (fast)<br>täglich | 2-4x<br>pro<br>Woche | 1x<br>pro<br>Woche | seltener | nie |
|--|-------------------|----------------------|--------------------|----------|-----|
| <i>Aktivitäten mit geringer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. kurze Spaziergänge, leichte Arbeiten im Garten/Haus...)                         |                   |                      |                    |          |     |
| <i>Aktivitäten mit mittlerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. lange Spaziergänge, Fahrradfahren, langsames Schwimmen...)                     |                   |                      |                    |          |     |
| <i>Aktivitäten mit größerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. Laufen, Joggen, zügiges Walken, (Bahn-)Schwimmen, Rennradfahren, Ballsport ...) |                   |                      |                    |          |     |



Wie oft üben Sie die folgenden Aktivitäten **in Ihrem Beruf** aus?

|  | (fast)<br>täglich | 2-4x<br>pro<br>Woche | 1x<br>pro<br>Woche | seltener | nie |
|--|-------------------|----------------------|--------------------|----------|-----|
| <i>Aktivitäten mit geringer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. kurze Spaziergänge, leichte Arbeiten im Garten/Haus...)   |                   |                      |                    |          |     |
| <i>Aktivitäten mit mittlerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. lange Spaziergänge, Fahrradfahren, langsames Schwimmen...)   |                   |                      |                    |          |     |
| <i>Aktivitäten mit größerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. Laufen, Joggen, zügiges Walken, (Bahn-)Schwimmen, Rennradfahren, Ballsport, schwere Gartenarbeit ...) |                   |                      |                    |          |     |

Bitte kreuzen Sie des Weiteren an, welche Antwort auf Sie zutrifft:

|   |    |    |      |    |
|---|----|----|------|----|
| Sprechen Sie mindestens zwei Sprachen flüssig?  | ja |    | nein |    |
| Wenn ja:<br>Benutzen Sie mind. zwei dieser Sprachen regelmäßig in Ihrem Alltag?   | ja |    | nein |    |
| Wenn ja:<br>Benutzen Sie diese Sprachen regelmäßig im Ihrem Alltag seit Ihrer Kindheit und/oder seit mehr als der Hälfte Ihrer Lebensjahre? | ja |    | nein |    |
| Haben Sie in Ihrer Kindheit oder Jugend ein Instrument spielen gelernt?   | ja |    | nein |    |
| Wenn ja: Wie viele Jahre dauerte der Instrumentalunterricht insgesamt?  | <5 | <7 | <9   | >9 |

Abschließend noch ein paar allgemeine Fragen zu Ihrer Person:

Welche **berufliche Tätigkeit** üben Sie zurzeit aus? Geben Sie bitte die genaue Bezeichnung an (z. B. nicht Elektriker, sondern Elektroinstallateur; nicht Verkäuferin, sondern Schuhverkäuferin; nicht Sachbearbeiter, sondern z. B. Arbeitsvorbereiter, Buchhalter)

---

Welchen höchsten **allgemeinbildenden Schulabschluss** haben Sie?

- 1 Schule ohne Abschluss beendet
- 2 Volks-/Hauptschulabschluss
- 3 Mittlere Reife, Realschulabschluss, Fachschulreife
- 4 Polytechnische Oberschule, Abschluss 8. oder 9. Klasse (POS)
- 5 Polytechnische Oberschule, Abschluss 10. Klasse (POS)
- 6 Fachhochschulreife, Abschluss einer Fachoberschule
- 7 Abitur (Hochschulreife), Erweiterte Oberschule (EOS) mit Abschluss 12. Klasse, Berufsausbildung mit Abitur

Welchen höchsten **Ausbildungsabschluss** haben Sie?

- 1 Abschluss einer beruflich-betrieblichen Berufsausbildung (Lehre)
- 2 Abschluss einer beruflich-schulischen Ausbildung (Berufsfach- oder Handelsschule)
- 3 Abschluss an einer Fachschule, Meister- oder Technikerschule, Berufs- oder Fachakademie
- 4 Fachhochschulabschluss
- 5 Hochschulabschluss

Welchen **Familienstand** haben Sie?

- 1 Ich bin verheiratet
- 2 Ich lebe in einer eingetragenen Lebenspartnerschaft
- 3 Ich bin ledig
- 4 Ich bin geschieden

Vielen Dank!

## Anhang C (Fortsetzung). Fragebogen zur Erfassung der CR (2015)

Die nachfolgenden Fragen beziehen sich auf Ihre **Freizeitgestaltung**.

Wie viele **Stunden** haben Sie schätzungsweise für Aktivitäten außerhalb Ihrer Arbeits- bzw. Berufstätigkeit **pro Woche**? \_\_\_\_\_ Stunden

Wenn Sie nun einmal an die **letzten 6 Monate** zurückdenken:

Beschreiben Sie bitte so konkret wie möglich **Aktivitäten/Hobbys**, denen Sie außerhalb Ihrer Berufstätigkeit (nach der Arbeit und/oder am Wochenende) **regelmäßig und gern** nachgegangen sind. Bitte nennen Sie die ungefähre Häufigkeit.

| AKTIVITÄTEN | 2-4x pro Woche | 1x pro Woche | 1-2 im Monat | alle 2-3 Monate | seltener |
|-------------|----------------|--------------|--------------|-----------------|----------|
| 1.          |                |              |              |                 |          |
| 2.          |                |              |              |                 |          |
| 3.          |                |              |              |                 |          |
| 4.          |                |              |              |                 |          |
| 5.          |                |              |              |                 |          |
| 6.          |                |              |              |                 |          |
| 7.          |                |              |              |                 |          |
| 8.          |                |              |              |                 |          |
| 9.          |                |              |              |                 |          |
| 10.         |                |              |              |                 |          |

Wie oft üben Sie die folgenden sportlichen Aktivitäten in Ihrer Freizeit aus?

|  | (fast) täglich | 2-4x pro Woche | 1x pro Woche | seltener | nie |
|--|----------------|----------------|--------------|----------|-----|
| <i>Aktivitäten mit geringer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. kurze Spaziergänge, leichte Arbeiten im Garten/Haus...)                         |                |                |              |          |     |
| <i>Aktivitäten mit mittlerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. lange Spaziergänge, Fahrradfahren, langsames Schwimmen...)                     |                |                |              |          |     |
| <i>Aktivitäten mit größerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. Laufen, Joggen, zügiges Walken, (Bahn-)Schwimmen, Rennradfahren, Ballsport ...) |                |                |              |          |     |

Wie oft üben Sie die folgenden sportlichen Aktivitäten in Ihrem Beruf aus?

|  | (fast)<br>täglich | 2-4x<br>pro<br>Woche | 1x<br>pro<br>Woche | seltener | nie |
|--|-------------------|----------------------|--------------------|----------|-----|
| <i>Aktivitäten mit geringer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. kurze Spaziergänge, leichte Arbeiten im Garten/Haus...)   |                   |                      |                    |          |     |
| <i>Aktivitäten mit mittlerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. lange Spaziergänge, Fahrradfahren, langsames Schwimmen...)   |                   |                      |                    |          |     |
| <i>Aktivitäten mit größerer körperlicher Anstrengung</i> (z.B. Laufen, Joggen, zügiges Walken, (Bahn-)Schwimmen, Rennradfahren, Ballsport, schwere Gartenarbeit ...) |                   |                      |                    |          |     |

Bitte kreuzen Sie des Weiteren an, welche Antwort auf Sie zutrifft:

|   |    |      |
|---|----|------|
| Sprechen Sie mindestens zwei Sprachen flüssig?  | ja | nein |
| Wenn ja:<br>Benutzen Sie mind. zwei dieser Sprachen regelmäßig in Ihrem Alltag?   | ja | nein |
| Wenn ja:<br>Benutzen Sie diese Sprachen regelmäßig im Ihrem Alltag seit Ihrer Kindheit und/oder seit mehr als der Hälfte Ihrer Lebensjahre? | ja | nein |
| Haben Sie ein Instrument spielen gelernt?   | ja | nein |
| Wenn ja: Wie viele Jahre dauerte der Instrumentalunterricht insgesamt?  |    |      |

Abschließend noch ein paar allgemeine Fragen zu Ihrer Person:

Nach wie vielen **Schuljahren** erlangten Sie Ihren höchsten Schulabschluss? \_\_\_\_\_

Wie viele Jahre dauerte Ihre **Berufsausbildung/Studium** (im Studium bitte Regelstudienzeit angeben)? \_\_\_\_\_

Bitte geben Sie an, **wie viele Jahre Sie jeweils** in den unterschiedlichen Berufskomplexitätsstufen gearbeitet haben (Ausbildung/Studium zählen nicht dazu):

| <b>Tätigkeit</b>  | <b>Jahre</b> | <b>Vollzeit</b> | <b>Teilzeit</b> | <b>stundenweise</b> |
|---|--------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 1. Hilfsarbeiter/in, Landarbeiter/in, Gärtner/in, Kellner/in, Angestellter/in bei einer Anrufzentrale, Elektriker/in, Babysitter, Haushaltshilfe, usw.                                    |              |                 |                 |                     |
| 2. Handwerker/in oder Facharbeiter/in, einfache/r Angestellte/r, Koch/Köchin, Verkäufer/in, Schneider/in, Krankenpfleger/in, Angehörige/r der Streitkräfte, Friseur/in, Vertreter/in usw. |              |                 |                 |                     |
| 3. Händler/in, leitende/r Angestellte/r, Handelsvertreter/in, Musiker/in, Immobilienmakler/in, Kindergärtner/in, usw.   |              |                 |                 |                     |
| 4. Leiter/in einer kleinen Firma, in qualifizierter selbstständiger Arbeit, Lehrer/in, Arzt/Ärztin, Anwalt/Anwältin, Psychologe/in, Ingenieur/in, usw.                                    |              |                 |                 |                     |
| 5. Leiter/in einer großen Firma, Tätigkeit mit hoher Verantwortung, Politiker, Universitätsdozent/in, Richter/in, Chirurg/in, Forscher/in, usw.   |              |                 |                 |                     |

**Bitte überprüfen Sie Ihre Angaben von 2013 auf Richtigkeit und korrigieren Sie sie gegebenenfalls:**

Welche **berufliche Tätigkeit** üben Sie zurzeit aus? Geben Sie bitte die genaue Bezeichnung an.

**Ihre Angabe:** xxxxxxxxx

---

Welchen höchsten **allgemeinbildenden Schulabschluss** haben Sie?

**Ihre Angabe:** xxxxxxxxx

---

Welchen höchsten **Ausbildungsabschluss** haben Sie?

**Ihre Angabe:** xxxxxxxxx

---

Vielen Dank!

#### **Anhang D. Vitalitätsparameter nach Meißner-Pöthig & Michalak (1997)**

| <b>Funktionsbereich</b> | <b>Funktionsindikatoren</b>   |
|-------------------------|---|
| <b>Physisch</b>         | Blutdruck, Hör- und Sehvermögen, Handkraft, Lungenvolumen, Verhältnis Körperfett zur Muskelmasse, Zahngesundheit, Trainingszustand  |
| <b>Kognitiv</b>         | optische und akustische Reaktion, verbale und kognitive Reaktionsfähigkeit (color word test), viseomotorische Koordination, Konzentrationsfähigkeit (Landolt-Test), psychomotorische Ausdauer (Tapping-Test) und Labyrinth-Test |
| <b>emotional-sozial</b> | Beschwerdefragebogen (BFB), Extro-/Introversion, Rigiditätsindex, Stressexposition, Stressdisposition, Soziale Potenz, Soziale Dominanz, Soziale Aktivitäten (Pflichten und Freizeit)   |

## Anhang E. Zuspiegelungserklärung

### Einverständniserklärung zur Zuspiegelung arbeitsmedizinischer Daten an Ihre Befragungsdaten im Projekt „Arbeit und Gesundheit“

In dieser arbeitsmedizinischen Zusatzuntersuchung möchten wir Sie nicht wiederholt zu Aspekten von Arbeit, Beruf und Gesundheit befragen. Damit die gesamte Untersuchung möglichst kurz gehalten wird, möchten wir in der Auswertung der Untersuchung Auszüge aus den Angaben aus der vorangegangenen Befragung einbeziehen.

Zum Zweck der Zuspiegelung dieser Daten an die Untersuchungsergebnisse setzt das Datenschutzgesetz Ihr Einverständnis voraus, um das wir Sie hiermit herzlich bitten. Die Daten werden ohne Ihren Namen miteinander verknüpft. Auch bei der weiteren Auswertung der Informationen ist sichergestellt, dass alle datenschutzrechtlichen Bestimmungen strengstens eingehalten werden und keine Weitergabe der Daten an Dritte erfolgt.

Ihre Einverständniserklärung ist selbstverständlich freiwillig. Sie können Sie auch jederzeit wieder zurückziehen.

Ich bin damit einverstanden, dass die Befragungsdaten mit in die Auswertung einbezogen und mit den arbeitsmedizinischen Untersuchungsergebnissen ausschließlich im Projekt „Arbeit und Gesundheit“ zusammengefügt werden. Ich behalte mir vor, mein Einverständnis jederzeit wieder zurückzuziehen.

Ort: \_\_\_\_\_, den \_\_\_\_\_ (Datum)

## Anhang F. Einwilligung zur Kontaktaufnahme

### Einverständniserklärung für eine Wiederholungsuntersuchung (2015)

Veränderungen in mentalen Funktionen lassen sich besser beschreiben, wenn die zugehörigen Messungen über die Zeit wiederholt werden. Daher planen wir eine Wiederholung der Untersuchung im Jahr 2015. Durch Ihr Mitwirken daran, kann die Aussagekraft der Studie entscheidend verbessert werden.

Wir wären Ihnen dankbar, wenn Sie sich für die weitere Teilnahme in unserem Forschungsprojekt entscheiden würden.

Für den Zweck der Kontaktaufnahme müssen wir Ihre Adresse aufbewahren. Nach Abschluss der Untersuchung wird die Adresse endgültig gelöscht. Es wird Ihnen vorbehalten, Ihr Einverständnis jederzeit wieder zurückzuziehen.

- - - - -

Ich bin damit einverstanden, dass meine Adresse für den Zweck der Kontaktaufnahme zu der Wiederholungstestung im Jahr 2015 in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) aufbewahrt wird. Ich behalte mir vor, mein Einverständnis jederzeit wieder zurückzuziehen.

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

*Bitte vollständig eintragen:*

\_\_\_\_\_  
Vorname, Name

\_\_\_\_\_  
Straße, Hausnummer

\_\_\_\_\_  
Postleitzahl

\_\_\_\_\_  
Wohnort

\_\_\_\_\_  
Telefon: Vorwahl

\_\_\_\_\_  
Rufnummer

\_\_\_\_\_  
Lfd.-Nr.:



## Anhang G. Einwilligungserklärung zur Teilnahme am Experiment

### Einwilligungserklärung

Hiermit erkläre ich freiwillig meine Bereitschaft, als Versuchsperson an Untersuchungen und Befragungen im Rahmen **der Studie „Mentale Gesundheit bei der Arbeit“** teilzunehmen.

Der Inhalt, der Ablauf, die Tragweite und die Risiken der Untersuchung wurden durch schriftliche und mündliche Informationen hinreichend verdeutlicht.

Durch meine Unterschrift gebe ich die Einwilligung, dass die von mir gemachten Angaben und die Untersuchungsergebnisse für die wissenschaftliche Auswertung benutzt werden dürfen. Alle Angaben werden streng vertraulich behandelt und unterliegen der ärztlichen Schweigepflicht. Die Ergebnisse werden nach Löschung von Namen und Adressen statistisch zusammengefasst und ausgewertet, so dass Rückschlüsse auf bestimmte Personen nicht möglich sind. Dabei wird grundsätzlich nach den Bestimmungen des Bundesdatenschutzgesetzes verfahren. Eine missbräuchliche Nutzung der Daten ist ausgeschlossen.

Um Ergebnisse besser auswerten zu können und auch für meine eigene Sicherheit ist es erforderlich, im Rahmen einiger Untersuchungen Videoaufzeichnungen / Mitschnitte zu machen. Der Grundsatz der anonymisierten Ergebnisdarstellung wird auch hierbei befolgt. Die Mitschnitte werden unverzüglich gelöscht, wenn sie nicht mehr benötigt werden. Ich bin mit der Speicherung meiner Daten und dem Mitschnitt / der Videoaufzeichnung im Rahmen des Forschungsprojektes, an dem ich teilnehme, einverstanden.

Mir ist bekannt, dass ich jederzeit ohne Begründung von der Untersuchung zurücktreten kann, ohne dass mir daraus Verpflichtungen oder persönliche Nachteile entstehen.

Über Art, Notwendigkeit, Durchführung und Risiken der Untersuchung wurde ich aufgeklärt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der Amtshaftung (Artikel 34 Satz 1 Grundgesetz i. V. m. § 839 Bürgerliches Gesetzbuch) für alle Schäden aufkommt, die ich im Zusammenhang mit der Untersuchung durch das schuldhaft (d. h. vorsätzliche oder fahrlässige) Handeln der Bediensteten erleide. Dabei habe ich als Geschädigter grundsätzlich die schuldhaft Amtspflichtverletzung zu beweisen. Mir ist ferner bekannt, dass ich für Schäden, die mir auf dem Weg von meiner Wohnung zum Untersuchungsort und zurück entstehen (sogenannter Wegeunfall), grundsätzlich keinen Schadensersatz von der Bundesrepublik Deutschland verlangen kann.

Ich bin mit der Teilnahme einverstanden. Ich verpflichte mich hiermit, mich während der Untersuchungen an die Anweisungen des Versuchsleiters/der Versuchsleiterin zu halten.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Name, Vorname: \_\_\_\_\_

Straße, Hausnummer: \_\_\_\_\_

Postleitzahl, Ort: \_\_\_\_\_

**Anhang H.** Mediane (M) der Reaktionszeiten (in ms) sowie Standardabweichungen (SD) für die jüngere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe               | Zeit | M (SD)                  |                         | N     |
|-----------------------|------|-------------------------|-------------------------|-------|
|                       |      | Bedingung 1<br>CRI; CR2 | Bedingung 2<br>CRI; CR2 |       |
| 0-back                | t1   | 359 (49); 354 (51)      | 327 (32); 324 (45)      | 14/14 |
|                       | t2   | 372 (54); 357 (45)      | 341 (45); 331 (51)      | 13/15 |
| 2-back                | t1   | 548 (122); 485 (87)     | 509 (100); 487 (112)    | 14/15 |
|                       | t2   | 575 (70); 511 (119)     | 501 (85); 438 (112)     | 13/15 |
| Sternberg-<br>(sukz.) | t1   | 904 (163); 820 (118)    | 842 (141); 762 (113)    | 14/15 |
|                       | t2   | 826 (151); 808 (128)    | 778 (113); 770 (135)    | 13/15 |
| Sternberg-<br>(sim.)  | t1   | 881 (161); 834 (95)     | 982 (164); 966 (129)    | 14/15 |
|                       | t2   | 846 (95); 817 (88)      | 970 (134); 917 (94)     | 13/15 |
| Stroop                | t1   | 899 (112); 891 (179)    | 1002 (130); 978 (124)   | 13/14 |
|                       | t2   | 847 (74); 851 (140)     | 957 (98); 920 (128)     | 13/15 |
| Switch                | t1   | 952 (144); 887 (168)    | 1010 (152); 966 (208)   | 14/15 |
|                       | t2   | 893 (117); 827 (129)    | 1001 (177); 924 (231)   | 13/15 |

**Anhang I.** Mediane (M) der Reaktionszeiten (in ms) sowie Standardabweichungen (SD) für die ältere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe               | Zeit | M (SD)                  |                         | N     |
|-----------------------|------|-------------------------|-------------------------|-------|
|                       |      | Bedingung 1<br>CRI; CR2 | Bedingung 2<br>CRI; CR2 |       |
| 0-back                | t1   | 371 (48); 363 (28)      | 336 (45); 327 (33)      | 18/10 |
|                       | t2   | 360 (56); 367 (35)      | 325 (40); 321 (29)      | 13/8  |
| 2-back                | t1   | 564 (140); 535 (132)    | 553 (101); 467 (95)     | 18/10 |
|                       | t2   | 524 (109); 449 (86)     | 498 (121); 409 (99)     | 13/8  |
| Sternberg-<br>(sukz.) | t1   | 880 (178); 906 (112)    | 822 (144); 797 (97)     | 18/10 |
|                       | t2   | 845 (138); 911 (107)    | 777 (166); 791 (69)     | 13/8  |
| Sternberg-<br>(sim.)  | t1   | 918 (66); 875 (70)      | 1060 (95); 1059 (96)    | 18/10 |
|                       | t2   | 865 (106); 856 (83)     | 1038 (124); 1036 (92)   | 12/8  |
| Stroop                | t1   | 1044 (157); 1001 (174)  | 1176 (223); 1127 (203)  | 18/10 |
|                       | t2   | 1059 (208); 945 (153)   | 1181 (247); 1032 (142)  | 13/8  |
| Switch                | t1   | 974 (169); 894 (114)    | 1073 (163); 971 (158)   | 18/10 |
|                       | t2   | 974 (171); 865 (153)    | 1092 (199); 922 (146)   | 13/8  |

**Anhang J.** Fehlerraten und Standardabweichungen (SD) für die jüngere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe                       | Zeit | <i>M (SD)</i>                  |                                | <i>N</i> |
|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
|                               |      | Bedingung 1<br><i>CR1; CR2</i> | Bedingung 2<br><i>CR1; CR2</i> |          |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 0.00 (0.00); 0.00 (0.00)       | 0.00 (0.00); 0.14 (0.36)       | 14/14    |
|                               | t2   | 0.08 (0.28); 0.07 (0.26)       | 0.08 (0.28); 0.07 (0.26)       | 13/15    |
| <i>2-back</i>                 | t1   | 1.43 (1.16); 1.47 (2.07)       | 2.57 (2.47); 2.80 (3.28)       | 14/15    |
|                               | t2   | 1.46 (1.94); 1.40 (2.16)       | 3.77 (3.42); 2.27 (3.31)       | 13/15    |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 3.57 (2.71); 2.67 (2.32)       | 9.29 (6.43); 6.67 (4.95)       | 14/15    |
|                               | t2   | 2.46 (2.54); 1.93 (2.02)       | 8.08 (5.89); 5.27 (4.92)       | 13/15    |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 5.64 (3.25); 4.13 (2.13)       | 11.43 (4.97); 7.73 (4.38)      | 14/15    |
|                               | t2   | 4.69 (1.93); 4.00 (2.62)       | 9.46 (4.79); 5.93 (3.67)       | 13/15    |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 2.38 (1.60); 2.57 (2.06)       | 2.69 (3.17); 2.21 (2.64)       | 13/14    |
|                               | t2   | 2.08 (1.19); 3.40 (3.29)       | 1.15 (1.21); 2.13 (2.64)       | 13/15    |
| <i>Switch</i>                 | t1   | 6.36 (7.31); 4.07 (4.46)       | 7.71 (6.73); 6.00 (3.95)       | 14/15    |
|                               | t2   | 3.46 (2.88); 2.80 (2.86)       | 5.23 (5.05); 5.00 (3.82)       | 13/15    |

**Anhang K.** Fehlerraten und Standardabweichungen (SD) für die ältere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe                       | Zeit | <i>M (SD)</i>                  |                                | <i>N</i> |
|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
|                               |      | Bedingung 1<br><i>CR1; CR2</i> | Bedingung 2<br><i>CR1; CR2</i> |          |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 0.00 (0.00); 0.20 (0.42)       | 0.11 (0.47); 0.00 (0.00)       | 18/10    |
|                               | t2   | 0.80 (0.28); 0.00 (0.00)       | 0.15 (0.38); 0.00 (0.00)       | 13/8     |
| <i>2-back</i>                 | t1   | 3.50 (3.09); 1.50 (1.58)       | 6.44 (5.15); 4.50 (4.90)       | 18/10    |
|                               | t2   | 2.92 (3.28); 0.88 (1.13)       | 4.77 (5.09); 1.50 (2.27)       | 13/8     |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 4.78 (2.71); 2.70 (2.36)       | 11.06 (8.43); 6.60 (2.91)      | 18/10    |
|                               | t2   | 4.38 (3.01); 2.25 (1.75)       | 13.3 (8.58); 4.80 (2.38)       | 13/8     |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 6.68 (6.63); 3.90 (2.42)       | 12.39 (7.29); 6.5 (2.42)       | 18/10    |
|                               | t2   | 4.67 (2.67); 3.38 (1.06)       | 11.58 (5.73); 6.63 (2.72)      | 12/8     |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 2.50 (1.76); 2.1 (1.52)        | 3.28 (4.78); 1.50 (1.90)       | 18/10    |
|                               | t2   | 2.31 (1.75); 2.63 (1.92)       | 1.85 (1.95); 2.00 (3.30)       | 13/8     |
| <i>Switch</i>                 | t1   | 9.61 (9.31); 1.70 (1.49)       | 10.44 (7.81); 3.70 (3.53)      | 18/10    |
|                               | t2   | 6.77 (8.93); 1.75 (1.28)       | 9.92 (8.52); 2.88 (1.36)       | 13/8     |

**Anhang L.** Interkorrelationsmatrix der Reaktionszeitmediane pro Aufgabe und Untersuchungszeitpunkt

| Aufgabe               | Zeit | 2-back | Sternberg-<br>(sukz.) | Sternberg-<br>(sim.) | Stroop | Switch |
|-----------------------|------|--------|-----------------------|----------------------|--------|--------|
| 0-back                | t1   | .385** | .250*                 | .283*                | .289*  | .322** |
|                       | t2   | .198   | .282*                 | .474**               | .247*  | .354** |
| 2-back                | t1   |        | .345**                | .281*                | .122   | .468** |
|                       | t2   |        |                       | .392**               | .287*  | .389** |
| Sternberg-<br>(sukz.) | t1   |        |                       | .387**               | .081   | .160   |
|                       | t2   |        |                       | .481**               | .277*  | .283*  |
| Sternberg-<br>(sim.)  | t1   |        |                       |                      | .396** | .209   |
|                       | t2   |        |                       |                      | .633** | .579** |
| Stroop                | t1   |        |                       |                      |        | .358** |
|                       | t2   |        |                       |                      |        | .555** |
| Switch                | t1   |        |                       |                      |        |        |
|                       | t2   |        |                       |                      |        |        |

N = 57 (t1). N = 49 (t2). \* $p \leq .05$ . \*\* $p \leq .01$ . (einseitig).

**Anhang M.** Interkorrelationsmatrix der Fehlerraten pro Aufgabe und Untersuchungszeitpunkt

| Aufgabe               | Zeit | 2-back | Sternberg-<br>(sukz.) | Sternberg-<br>(sim.) | Stroop | Switch |
|-----------------------|------|--------|-----------------------|----------------------|--------|--------|
| 0-back                | t1   | .306*  | .223*                 | .037                 | .116   | .219   |
|                       | t2   | .097   | .234                  | .169                 | .225   | .164   |
| 2-back                | t1   |        | .590**                | .423**               | .432** | .453** |
|                       | t2   |        |                       | .641**               | .359*  | .719** |
| Sternberg-<br>(sukz.) | t1   |        |                       | .498**               | .398*  | .539** |
|                       | t2   |        |                       | .704**               | .333** | .713*  |
| Sternberg-<br>(sim.)  | t1   |        |                       |                      | .396** | .209   |
|                       | t2   |        |                       |                      | .326*  | .657** |
| Stroop                | t1   |        |                       |                      |        | .424** |
|                       | t2   |        |                       |                      |        | .373** |
| Switch                | t1   |        |                       |                      |        |        |
|                       | t2   |        |                       |                      |        |        |

N = 57 (t1). N = 49 (t2). \* $p \leq .05$ . \*\* $p \leq .01$ . (einseitig).

**Anhang N.** P3-Peak-Amplituden (in  $\mu\text{V}$ ) und Standardabweichungen (SD) an der Pz Elektrode für die jüngere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe                       | Zeit | <i>M (SD)</i>                  |                                | <i>N</i> |
|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
|                               |      | Bedingung 1<br><i>CR1; CR2</i> | Bedingung 2<br><i>CR1; CR2</i> |          |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 16.01 (6.01); 17.17 (7.07)     | 17.20 (5.14); 18.33 (7.03)     | 14/14    |
|                               | t2   | 16.80 (5.64); 16.04 (6.18)     | 16.60 (6.11); 17.20 (6.35)     | 13/15    |
| <i>2-back</i>                 | t1   | 10.18 (3.79); 12.07 (4.55)     | 9.76 (4.66); 12.89 (5.59)      | 14/15    |
|                               | t2   | 10.80 (4.62); 12.75 (5.70)     | 10.38 (3.74); 14.10 (6.50)     | 13/15    |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 8.49 (5.26); 9.44 (5.86)       | 10.43 (5.31); 11.86 (6.41)     | 14/14    |
|                               | t2   | 9.13 (5.86); 8.50 (4.77)       | 9.07 (4.69); 9.57 (5.41)       | 13/15    |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 7.31 (4.06); 9.60 (3.85)       | 5.21 (4.88); 6.53 (3.00)       | 14/15    |
|                               | t2   | 9.42 (3.88); 9.78 (5.08)       | 7.14 (3.72); 7.86 (4.49)       | 13/15    |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 8.11 (4.04); 9.77 (4.62)       | 6.89 (3.38); 8.66 (4.58)       | 13/14    |
|                               | t2   | 8.87 (4.36); 8.82 (4.91)       | 6.92 (4.85); 8.32 (5.52)       | 12/14    |
| <i>Switch</i>                 | t1   | 6.99 (3.31); 9.64 (3.68)       | 7.17 (4.05); 7.10 (3.60)       | 14/15    |
|                               | t2   | 8.43 (5.00); 10.23 (4.34)      | 7.42 (4.10); 7.57 (4.32)       | 13/15    |



**Anhang O.** P3-Peak-Amplituden (in  $\mu\text{V}$ ) und Standardabweichungen (SD) an der Pz Elektrode für die ältere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe                       | Zeit | <i>M (SD)</i>                  |                                | <i>N</i> |
|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
|                               |      | Bedingung 1<br><i>CR1; CR2</i> | Bedingung 2<br><i>CR1; CR2</i> |          |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 13.79 (4.86); 10.73 (5.46)     | 15.88 (5.19); 13.61 (5.33)     | 18/10    |
|                               | t2   | 16.90 (3.31); 12.36 (7.44)     | 19.35 (3.46); 14.14 (8.19)     | 13/8     |
| <i>2-back</i>                 | t1   | 12.28 (6.35); 9.61 (4.87)      | 10.82 (5.34); 10.11 (7.46)     | 17/10    |
|                               | t2   | 15.05 (4.64); 11.67 (6.41)     | 15.19 (5.16); 13.09 (7.92)     | 13/8     |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 8.34 (5.82); 4.27 (4.64)       | 11.63 (5.68); 7.13 (5.14)      | 18/10    |
|                               | t2   | 8.15 (5.94); 4.09 (5.42)       | 12.07 (5.90); 5.13 (2.85)      | 13/8     |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 8.60 (5.38); 5.15 (5.62)       | 7.38 (5.77); 1.78 (5.05)       | 18/10    |
|                               | t2   | 11.07 (5.12); 6.73 (6.58)      | 7.59 (5.40); 2.46 (6.07)       | 13/8     |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 8.14 (4.10); 7.51 (4.87)       | 7.36 (4.50); 5.95 (4.41)       | 18/10    |
|                               | t2   | 11.51 (4.70); 6.16 (3.31)      | 7.23 (2.98); 3.25 (3.05)       | 13/5     |
| <i>Switch</i>                 | t1   | 6.86 (3.36); 6.67 (5.09)       | 4.94 (3.41); 5.54 (4.69)       | 18/10    |
|                               | t2   | 8.16 (3.32); 8.83 (6.36)       | 7.04 (2.61); 5.10 (5.96)       | 13/8     |

**Anhang P.** P3-Peak-Latenzen (in ms) und Standardabweichungen (SD) an der Pz Elektrode an der Pz Elektrode für die jüngere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe                       | Zeit | <i>M (SD)</i>                  |                                | <i>N</i> |
|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
|                               |      | Bedingung 1<br><i>CR1; CR2</i> | Bedingung 2<br><i>CR1; CR2</i> |          |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 460 (110); 423 (65)            | 425 (93); 424 (56)             | 14/14    |
|                               | t2   | 443 (70); 438 (73)             | 418 (48); 403 (61)             | 13/15    |
| <i>2-back</i>                 | t1   | 596 (144); 512 (131)           | 564 (159); 571 (121)           | 14/15    |
|                               | t2   | 588 (101); 496 (123)           | 554 (141); 508 (159)           | 13/15    |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 469 (85); 407 (87)             | 478 (112); 469 (136)           | 14/14    |
|                               | t2   | 451 (59); 468 (110)            | 480 (113); 521 (128)           | 13/15    |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 559 (113); 490 (102)           | 567 (93); 498 (141)            | 14/15    |
|                               | t2   | 595 (94); 508 (107)            | 576 (106); 487 (136)           | 13/15    |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 472 (141); 513 (146)           | 466 (122); 490 (142)           | 13/14    |
|                               | t2   | 512 (69); 462 (128)            | 540 (135); 451 (119)           | 12/14    |
| <i>Switch</i>                 | t1   | 515 (117); 495 (124)           | 500 (111); 456 (58)            | 14/15    |
|                               | t2   | 535 (124); 465 (59)            | 582 (118); 460 (69)            | 13/15    |

**Anhang Q.** P3-Peak-Latenzen (in ms) und Standardabweichungen (SD) an der Pz Elektrode für die ältere Probandengruppe pro Aufgabe, Aufgabenbedingung, Untersuchungszeitpunkt und CR

| Aufgabe                       | Zeit | <i>M (SD)</i>                  |                                | <i>N</i> |
|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
|                               |      | Bedingung 1<br><i>CR1; CR2</i> | Bedingung 2<br><i>CR1; CR2</i> |          |
| <i>0-back</i>                 | t1   | 504 (97); 427 (73)             | 485 (92); 440 (80)             | 18/10    |
|                               | t2   | 476 (68); 443 (89)             | 462 (74); 398 (63)             | 13/8     |
| <i>2-back</i>                 | t1   | 645 (120); 496 (174)           | 585 (108); 562 (175)           | 17/10    |
|                               | t2   | 617 (104); 543 (195)           | 586 (132); 513 (160)           | 13/8     |
| <i>Sternberg-<br/>(sukz.)</i> | t1   | 529 (98); 424 (64)             | 552 (123); 555 (119)           | 18/10    |
|                               | t2   | 460 (59); 424 (80)             | 473 (96); 469 (101)            | 13/8     |
| <i>Sternberg-<br/>(sim.)</i>  | t1   | 556 (121); 517 (115)           | 589 (87); 464 (128)            | 18/10    |
|                               | t2   | 592 (81); 574 (102)            | 512 (113); 579 (85)            | 13/8     |
| <i>Stroop</i>                 | t1   | 551 (119); 553 (165)           | 532 (142); 517 (159)           | 18/10    |
|                               | t2   | 578 (143); 656 (107)           | 589 (132); 539 (132)           | 13/5     |
| <i>Switch</i>                 | t1   | 553 (92); 491 (96)             | 520 (120); 501 (126)           | 18/10    |
|                               | t2   | 529 (92); 536 (124)            | 595 (77); 536 (130)            | 13/8     |